

DIRCE KINUE MATSUNAGA

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE MADEIRA COMERCIAL
DE *Pinus taeda* L. E DA ADEQUABILIDADE DA NORMA
EUROPÉIA UNIFICADA (CEN), À CONSTRUÇÃO
DE VIGAS LAMINADAS COLADAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do Título de "Mestre em Ciências - M.Sc.", no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sidon Keinert Jr.

CURITIBA
1995

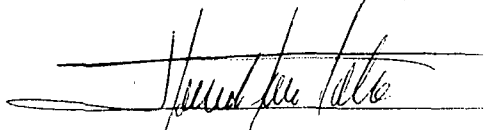
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

P A R E C E R

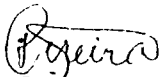
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, reuniram-se para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pela candidata **DIRCE KINUE MATSUNAGA**, sob o título "**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE MADEIRA COMERCIAL DE *Pinus taeda* L. E DA ADEQUABILIDADE DA NORMA EUROPÉIA UNIFICADA (CEN), À CONSTRUÇÃO DE VIGAS LAMINADAS COLADAS.**", para obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Área de concentração em **TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS**.

Após haver analisado o referido trabalho e arguido a candidata são de parecer pela "**APROVAÇÃO**" da Dissertação com média final: (8,83), correspondente ao conceito: (A).

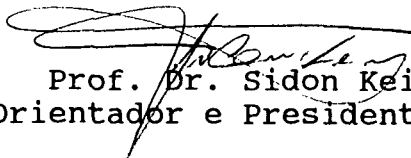
Curitiba, 25 de agosto de 1995



Prof. Dr. Hernando Alfonso Lara Palma
Primeiro Examinador



Pesq. Dr. José Carlos Duarte Pereira
Segundo Examinador



Prof. Dr. Sidon Keinert Jr
Orientador e Presidente da Banca

À memória de meus avós

Aos meus pais
Tadashi e Amélia,

aos meus filhos
Davidson, Mary e Diógenes

e ao Mário, meu esposo

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Sidon Keinert Junior, pela orientação ministrada, tornando possível o desenvolvimento e a conclusão deste estudo.

Ao professor Jorge Luís M. de Matos, por ter sido não somente um co-orientador, mas acima de tudo o amigo sempre presente nas decisões, na condução e na realização deste trabalho.

Aos professores Dr. João Carlos Moreschi, Dr. Roberto Tsuyoshi Hosokawa, Dr. Setsuo Iwakiri, Dra. Yoshiko S. Kuniyoshi e Dra. Graciela I.B. Muñiz, cujas manifestações de incentivo se constituíram em fator definitivo para a conclusão deste trabalho.

Ao professor Dr. Amauri Simioni, pela contribuição e apoio recebido.

Ao professor Dr. Ivan Tomaselli por suas sugestões e colaboração recebida.

À PREMONTAL Construções Premontadas Ltda., especialmente na pessoa do sócio Diretor, engenheiro civil Hisashi Furuie, pelo auxílio e apoio recebidos na realização deste estudo.

Ao Sr. Guenther Kollarzs da empresa PREMONTAL, pela participação efetiva na pesquisa, ao longo de seu desenvolvimento experimental.

Ao funcionário Jair da empresa PREMONTAL, pela valiosa colaboração nos serviços de elaboração da parte experimental do trabalho. A todos os funcionários da empresa, pelo auxílio constante prestado durante a fase experimental deste estudo.

A Ricardo Klitzke e Vitor Daniel Herrera, do Laboratório de Tecnologia, pelo apoio e auxílio na elaboração dos corpos de prova e na realização dos ensaios.

Aos funcionários do Laboratório de Tecnologia da Madeira, Antonio e Ademir, pelo auxílio prestado durante o desenvolvimento do trabalho.

A todos os professores da Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, pelos ensinamentos recebidos.

Aos professores Dr. João Cesar Hellmeister e Dra. Akemi Ino da Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, pelo apoio e colaboração manifestados.

Às bibliotecárias do Setor de Ciências Agrárias, Liliana, Doroty e Evelin pelo auxílio na pesquisa bibliográfica e obtenção de material bibliográfico.

À ALBA SA. representada pelo engenheiro Antonio Carlos, pelo fornecimento do adesivo.

À SEMA - Secagem de Madeiras Ltda. representada pelos engenheiros Eduardo e Isaac, pela realização da secagem da madeira.

À coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná que possibilitou a realização do curso.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo auxílio financeiro na realização do curso.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, na pessoa do Dr. Marcio Augusto Rabelo Nahuz e Dr. Reinaldo Herrero Ponce, pelo auxílio prestado, na obtenção e envio de normas técnicas.

Aos professores e amigos, Umberto Klock, Márcio Pereira da Rocha, Ghislaine Miranda, Élio José Santini, Edvá Oliveira Brito e aos colegas de sempre, pela convicção despertada em se continuar no caminho de buscas e de realizações.

À minha família pela compreensão, motivação, força, paciência e dedicação.

SUMÁRIO

	página
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS	viii
SIMBOLOGIA.....	ix
RESUMO.....	xii
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1 DEFINIÇÕES E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE VIGAS LAMINADAS	3
2.2 ALGUNS ASPECTOS DA MADEIRA LAMINADA COLADA NO BRASIL.....	5
2.3 VANTAGENS DA CONSTRUÇÃO DE PEÇAS LAMINADAS	6
2.4 FATORES ENVOLVIDOS NA PRODUÇÃO DA MADEIRA LAMINADA.....	8
2.5 FATORES IMPORTANTES NA RESISTÊNCIA DA MADEIRA LAMINADA COLADA	9
2.5.1 A QUALIDADE E FATORES DE RESISTÊNCIA DA MADEIRA	18
2.5.1.1 QUALIDADE DA MADEIRA.....	18
2.5.1.2 FATORES DE RESISTÊNCIA DA MADEIRA.....	21
2.5.2 A CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA PARA PEÇAS LAMINADAS.....	26
2.5.2.1 A CLASSIFICAÇÃO VISUAL DA MADEIRA.....	28
2.5.2.2 A CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A RIGIDEZ E A APARÊNCIA	32
2.5.2.3 A CLASSIFICAÇÃO ATRAVÉS DA PROVA DE CARGA	42
2.5.3 AS EMENDAS DA MADEIRA.....	45
2.5.4 ADESIVOS.....	55
2.5.5 A INFLUÊNCIA DOS “NÓS”.....	61
2.5.6 A INFLUÊNCIA DA ALTURA DA SEÇÃO TRANSVERSAL.....	65
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
3.1 COLETA E PREPARO DO MATERIAL.....	71
3.2 DESCRIÇÃO DO MATERIAL E CLASSIFICAÇÃO INICIAL	71
3.2.1 ESPESSURA DAS TÁBUAS.....	73

3.2.2	TEOR DE UMIDADE DAS TÁBUAS.....	73
3.2.3	ADESIVO UTILIZADO.....	75
3.2.4	CONFECÇÃO DAS EMENDAS E AJUSTE DE COMPRIMENTO.....	76
3.2.5	PREPARAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DAS TÁBUAS.....	77
3.3	TESTES DO MATERIAL.....	78
3.3.1	TESTES EM CORPOS DE PROVA LIVRES DE DEFEITOS.....	78
3.4	CLASSE DAS TÁBUAS	81
3.4.1	CLASSIFICAÇÃO.....	81
3.5	POSICIONAMENTO DAS TÁBUAS NAS VIGAS.....	85
3.6	SISTEMA DE PRENSAGEM	85
3.7	MONTAGEM DAS VIGAS	86
3.8	APLICAÇÃO DA PRESSÃO	87
3.9	MODELOS DE VIGAS CONSTRUÍDAS	88
3.10	PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	90
3.11	PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS.....	93
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
4.1	CLASSES DA MADEIRA.....	95
4.2	PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E DE RIGIDEZ.....	98
4.2.1	CORPOS DE PROVA LIVRES DE DEFEITOS.....	98
4.2.2	VIGAS LAMINADAS.....	101
4.2.2.1	MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL(E).....	101
4.2.2.2	MÓDULO DE RUPTURA.....	104
4.2.2.3	TENSÕES DE CISALHAMENTO.....	106
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS NAS VIGAS..	108
4.3.1	CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS.....	109
4.3.2	MODELO ESTIMADOR.....	111
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	117
	ANEXOS	122
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
01 Tipos básicos de madeira laminada colada (FREAS & SELBO, 1954).....	5
02 Principais tipos de emendas das tábuas (FREAS & SELBO, 1954)	46
03 Resistência máxima a tração paralela às fibras de emendas biseladas, em relação à inclinação do bisel (FREAS & SELBO, 1954)	49
04 Vista do detalhe do sistema de remoção dos nós	73
05 Esquema do sistema de prensagem para as emendas biseladas (CHUGG, 1964).....	77
06 Corpo de prova da emenda biselada (DIN 53.253)	80
07 Esquema de aplicação da carga na máquina de classificação estrutural (ROSS e PELLERIN, 1994).....	83
08 Vista da máquina de classificação estrutural	84
09 Representação esquemática da aplicação de carga na prensa com vigas	86
10 Vista parcial da prensagem das vigas	87
11 Verificação da pressão aplicada com o torquímetro	88
12 Seção transversal das vigas confeccionadas e testadas	89
13 Vista parcial de algumas vigas, antes de serem ensaiadas	90
14 Esquema do ensaio das vigas (ASTM 198-27).....	91
15 Vista do sistema de aplicação da carga e de leitura dos dados, nos testes de flexão estática.....	92
16 Vista geral do sistema de realização do ensaio das vigas laminadas	93
17 Distribuição do módulo de elasticidade médio das tábuas.....	96
18 Esquema do sistema de testes de cisalhamento com aplicação da carga em 5 pontos (RAMMER e SOLTIS, 1994).....	107
19 Gráfico demonstrativo do relacionamento entre as variáveis MOE_{VIGA} e $MOE_{TÁBUAS\ MÉDIA\ 2\ PONTOS}$, verificado através da regressão linear.....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
01	Tamanho máximo dos nós, de tábuas classificadas para peças laminadas (CHUGG, 1964).....	33
02	Resumo das pesquisas sobre correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à flexão em tábuas de coníferas, testadas na face maior (ROSS e PELLERIN, 1994).....	42
03	Influência do fator tamanho na relação vão/ altura das vigas (AITC- 117/ 71).....	68
04	Limites dos valores do módulo de elasticidade para cada classe de resistência definida.....	82
05	Classificação das vigas e número de modelos	90
06	Resultado da classificação mecânica das tábuas pelos seus valores médios do do E, determinados em quatro pontos, em intervalos de 90 cm	95
07	Classes de madeira requeridas para as vigas homogêneas (LH).....	97
08	Classes de madeira requeridas para as vigas combinadas (LC).....	98
09	Propriedades físicas e mecânicas das tábuas de <i>Pinus taeda</i> , utilizadas na montagem das vigas laminadas (corpos de prova livre de defeitos).....	100
10	Valores do módulo de elasticidade, ajustados ao teor de umidade de 12% Comparativo dos resultados médios determinados nos testes de flexão estática das vigas laminadas, com os valores requeridos pela CEN.....	102
11	Valores médios do módulo de ruptura (MPa), ajustados ao teor de umidade de 12%	104
12	Valores médios da tensão de cisalhamento (Mpa), ajustados ao teor de umidade de 12%	107
13	Equações testadas e valores dos coeficientes de determinação, para o módulo de ruptura e tensão de cisalhamento das vigas laminadas	116

SIMBOLOGIA

A	=	área da seção transversal
b	=	largura da seção transversal
d, h	=	altura da seção transversal
d _f	=	altura da fundação elástica
E	=	módulo de elasticidade
EI	=	rigidez da viga homogeneizada
ε	=	deformação
E _p	=	módulo de elasticidade da madeira paralelo às fibras.
E _n	=	módulo de elasticidade da madeira normal às fibras
E	=	módulo de elasticidade da viga laminada colada
F _h	=	fator de altura
f	=	flecha no meio do vão
F	=	força
f _b	=	flecha devido ao momento fletor
G	=	módulo de cisalhamento, módulo de deformação transversal.
h _i	=	espessura i da tábua
I	=	momento de inércia
I _k /I _g	=	proporção dos nós (fator adimensional)
I _k	=	momento de inércia da área transversal ocupada pelos nós num comprimento de 6" de cada lado da seção considerada crítica das tábuas.
I _g	=	momento de inércia de toda a seção transversal das tábuas.
k	=	constante de proporcionalidade
L	=	vão na direção longitudinal das fibras
LH	=	viga laminada homogênea
LC	=	viga laminada combinada
M	=	momento fletor
MOR	=	módulo de ruptura
N	=	carga axial aplicada
P	=	carga concentrada
p	=	carga distribuída por metro quadrado
q	=	carga distribuída por metro linear
Q ou V	=	esforço cortante
R	=	resultante das forças
v	=	volume
t	=	posição da linha neutra
y	=	distância da linha neutra às fibras externas
y'	=	distância da linha neutra à borda comprimida
y''	=	distância da linha neutra à borda tracionada
v	=	coeficiente de Poisson

α	=	coeficiente de deformação ou de dilatação
Δ	=	deflexão, deformação na flexão
ϕ	=	ângulo
δ	=	variação, alongamento total
τ	=	tensão de cisalhamento
σ_x	=	tensão longitudinal normal de flexão
σ'	=	tensão na borda comprimida
σ''	=	tensão na borda tracionada
σ_c	=	tensão de compressão
σ_t	=	tensão de tração
σ_r	=	tensão radial

Índices subscritos:

c = compressão	T = tangencial
b = flexão	t = tração
i = camada i	s = cisalhamento
m = flexão	x = relacionado à direção do eixo x
n = tábua n	y = relacionado à direção do eixo y
L = longitudinal	0 (zero) = na direção da fibra, paralelo à grã.
N = normal	90 = perpendicular à direção das fibras,
p = paralelo	perpendicular à grã.
R = radial	

RESUMO

Este estudo foi conduzido com o objetivo de verificar o comportamento de vigas laminadas coladas produzidas com madeira comercial de *Pinus taeda* L., classificadas mecanicamente, correlacionando-se as propriedades de resistência e de rigidez das tábuas com as propriedades das vigas no teste de flexão estática. A análise foi realizada através de equações de regressão e de relações matemáticas por diagramas representativos de tal comportamento na prática. Na fase inicial, foram testados corpos de prova livres de defeitos, sendo os resultados utilizados como subsídio para a determinação dos limites das classes de esforços e para a caracterização das propriedades mecânicas da madeira. A classificação da madeira foi baseada nas classes de resistência estabelecidas pelas especificações do Comitê Europeu de Normatização-CEN. As vigas laminadas foram construídas, com dimensões nominais de 13 x 23 x 400 cm., sendo confeccionados oito grupos de vigas, com média de três repetições em cada grupo e submetidas ao teste mecânico destrutivo em flexão estática. Os resultados experimentais obtidos foram analisados estatisticamente, pela correlação dos valores de rigidez, determinados nas vigas, formadas pelos oito tratamentos, com tábuas selecionadas e posicionadas de acordo com os critérios estabelecidos pela citada norma, de classificação e de distribuição. O objetivo final deste estudo foi verificar os modelos de análise de regressão simples que pudessem estimar o valor do módulo de elasticidade de uma viga, em função de parâmetros determinados para a madeira, na classificação não destrutiva (NDT). Na avaliação da influência dos valores dos módulos de elasticidade das tábuas na propriedade de rigidez das vigas, o modelo linear $y = a + bx$ apresentou ajuste adequado à correlação das variáveis, demonstrando aumento nos valores do módulo de elasticidade das vigas com o aumento nos valores de rigidez das tábuas. Das equações desenvolvidas para estimar a rigidez das vigas, apresentou melhor adequação, a equação envolvendo análise agrupada de todas as classes estudadas, $MOE_{vigas} = 34782 + 0,550 * MOE_{tábuas}$. Nos resultados obtidos, em termos de rigidez, os valores do módulo de elasticidade apresentaram níveis próximos, comparáveis aos valores requeridos para vigas laminadas produzidas com madeiras de pinus europeus. Na classificação das tábuas individuais, a variável $MOE_{tábuas}$ medida em dois pontos médios centrais, apresentou os melhores coeficientes de correlação.

ABSTRACT

This research was conducted to verify the behavior of laminated beams manufactured with machine stress graded commercial *Pinus taeda* L. wood, correlating the resistance and strength properties of the lamination lumber with the beams properties by the static bending test. The analysis was conducted by regression equations, mathematics relations and by diagrams representatives of this behaviour in use. In the initial phase, were tested clear specimens, being the results used as subsidy to determinate the limits of strength classes, and to the characterize of the wood mechanical properties. The wood classification was based in resistance classes established by the European Comitee of Normalisation - CEN. The laminated beams were constructed, with nominal dimensions of 13 x 23 x 400 cm., in eight sets, with an average of three repetitions in each set and submitted to destructive mechanical test in static bending. The obtained experimental results were analysed statistically, by rigidity values correlation, determined in the beams, formed by the eight treatments, with graded lumbers and positioned according to the established rules of the cited standard, of grading and distribution. The final objective of this research was verify the models of simple regression analysis that can effect the estimation of the modulus of elasticity value of a beam, in function of determined parameters to the wood, in nondestructive testing (NDT). The evaluation of the influence of the modulus of elasticity of the lumber pieces in property of beams rigidity, was made by the analysis of regression equations models. The linear model $y = a + bx$, presented adequate adjustment to the correlation of the variables, demonstrating an increase in the rigidity of the beams with the increase in rigidity values of the lamination lumber. From the equations developed to estimate the beams rigidity, the most adequate model was the one equation involving grouped analysis of the all studied classes, $MOE_{BEAMS} = 34782 + 0,550 * MOE_{LAMINATION LUMBER}$. In the obtained results, in terms of rigidity, the modulus of elasticity values presented very levels, comparable to the required values to laminated beams made with european pine wood beams. In the machine stress grading of lamination lumber, the variable $MOE_{LUMBER PIECES}$, evaluated in two medium central points, presented the best correlation coefficients.

1. INTRODUÇÃO

A madeira sempre ocupou um lugar de importância na construção civil, devido ao seu fácil emprego com relação à sua eficiência. Contudo, a madeira sólida vem sofrendo limitações gradativas, em consequência da redução de disponibilidade no mercado. Tal redução decorre da escassez de madeiras nativas, que vinham suprimindo este mercado, com características de resistência e de dimensões necessárias a essa utilização.

As atuais perspectivas do setor florestal conduzem ao uso de madeiras oriundas de reflorestamentos, especialmente de algumas espécies de *Pinus*, as quais, apresentam rápido crescimento, associado à grande produtividade, porém, com características físicas e mecânicas ainda não bem determinadas para compor elementos de função estrutural. A viabilização do emprego desta matéria prima pode ser realizada através da recomposição de tábuas selecionadas e coladas com adesivos, formando peças de dimensões estruturais.

A composição destas peças, conhecidas como Madeira Laminada Colada, resulta num produto estrutural, formado por associação de lâminas de madeira, onde os materiais básicos são as tábuas de serrarias, de espessuras reduzidas, com larguras e comprimentos variáveis, as quais são coladas com adesivos ou resinas para madeira.

O elemento estrutural de madeira laminada colada é o resultado da união por meio de adesivos, de duas ou mais peças de madeira, de modo que as suas fibras tenham direções paralelas ao eixo longitudinal do elemento em construção.

Entre as variáveis inerentes para a utilização desta matéria prima, a massa específica e as dimensões da madeira serrada são de importância para a confecção de vigas laminadas. Além disso, o aproveitamento da madeira de pequenas dimensões para uso estrutural, com incidência de pequenos defeitos, pelo controle da distribuição adequada dos mesmos, abre caminhos para competir com vigas de madeira sólida.

A concretização da unificação da Comunidade Econômica Européia (CEE) no oeste da Europa, tem apresentado um significativo efeito no comércio internacional. Junto a óbvias implicações econômicas de um amplo mercado, um importante aspecto do processo de unificação é o desenvolvimento de projetos comuns de construção e elaboração de normas dos produtos. Atualmente encontra-se em desenvolvimento a elaboração de normas uniformes de deztoito países europeus sob o patrocínio do Comitê Europeu de Normatização (CEN). Para que as normas não fossem diferentemente utilizadas por países individuais, foi necessário que as nações decidissem pela avaliação de seus produtos através da EEC relacionada à norma CEN. O estabelecimento de normas que possam representar o nível de desempenho de vários produtos de madeira, é especialmente importante para países Sul Americanos, visto que suas economias dependem em boa parte da exportação de produtos florestais, para países europeus.

O objetivo básico deste estudo é caracterizar o desempenho de vigas retas laminadas horizontalmente, confeccionadas com a madeira comercial de *Pinus taeda* L., classificadas pelo teste mecânico não destrutivo (NDT), relacionadas ao desenvolvimento das normas do Comitê Europeu de Normatização-CEN, Normas Comuns Unificadas Para Madeiras Estruturais. Este estudo envolve ainda testes de resistência e rigidez da madeira, para o estabelecimento de classes das tábuas especificadas na citada norma, testes nas emendas biseladas e em vigas laminadas à flexão estática.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar as propriedades mecânicas da madeira comercial de *Pinus taeda* L. e determinar seu enquadramento nas classes estruturais segundo as especificações da CEN.
- Avaliar as propriedades de resistência e de rigidez à flexão estática das vigas laminadas horizontalmente, construídas através da classificação estrutural estabelecida para as tábuas.
- Determinar modelos de análise de regressão que melhor se adequem à estimativa das propriedades das vigas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 DEFINIÇÕES E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA LAMINADA COLADA

O elemento estrutural de madeira laminada colada é o resultado da união por adesivos, de duas ou mais peças de madeira, de modo que as suas fibras tenham as direções paralelas ao eixo longitudinal do elemento em construção. As emendas coladas nas extremidades, permitem formar peças com dimensões ilimitadas que funcionam como uma só unidade estrutural.

Dependendo do elemento de união utilizado, podem ser obtidos diferentes tipos de madeira laminada. Se o elemento de união for o prego, tem-se a madeira laminada pregada; se for o parafuso, tem-se a madeira laminada parafusada e se for o adesivo, tem-se a madeira laminada colada.

FREAS E SELBO (1954), definem o termo madeira laminada colada aplicado a peças estruturais como o material colado de pequenas peças de madeira, na forma reta ou curvas, com as fibras de todas as lâminas paralelas ao comprimento da peça. As lâminas podem ser de diferentes espécies de madeira, espessuras, larguras e comprimentos variáveis, que são coladas borda a borda para se obter peças de qualidade e de dimensões desejadas. São fatores que proporcionam infinitas escolhas no projeto, condicionados apenas ao uso final e aos fatores econômicos envolvidos na produção.

Contudo, uma definição genérica de madeira laminada colada pode abranger diversos tipos de compostos de madeira formados a partir de lâminas. Tornando-se necessário fazer constar neste estudo alguns termos e conceitos, comumente utilizados por alguns autores, para identificar e diferenciar esses produtos:

A Madeira Laminada Colada

- O termo GLULAM, segundo CHUGG (1964), é empregado como uma abreviação da madeira laminada colada estrutural, a qual é construída com todas as fibras da madeira po-

sicionadas paralelamente ao eixo da peça, para formar peças com a função de um único elemento estrutural.

A Madeira Folhada Colada

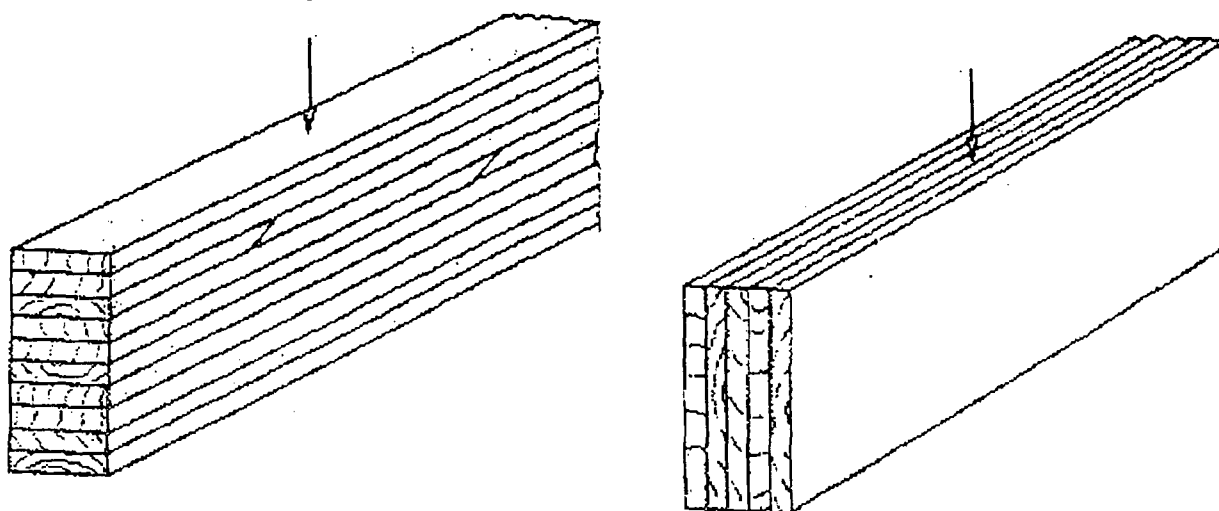
- Segundo Bohlen (1972), Stump, Smith e Gray (1981) (apud. MANTILLA, 1989), o termo LVL é utilizado como abreviação de “laminated veneer lumber” e consiste na composição de folhas finas de madeira previamente selecionadas e coladas com as fibras paralelas formando um único elemento estrutural. Para Jung (1984) (apud. MANTILLA, 1989), o mesmo material é denominado de PLV como abreviatura de “parallel-laminated veneer”. Já Youngquist et alli (1978 e 1979) (apud. MANTILLA C. 1989), afirma que para o mesmo material, o termo PRESS-LAM foi idealizado para representar o uso conjunto de pressão para a secagem de lâminas finas de madeira e a aplicação de pressão durante a colagem, podendo ser considerado sinônimo de LVL e PLV.

- Para Kunesch (1978) (apud. MANTILLA, 1989), o termo Micro-Lam é um produto resultante da colagem de lâminas de madeira, de pouca espessura (LVL), com características de elevada resistência.

Entre as características que diferenciam a madeira laminada colada da madeira folhada colada podem ser citadas as espessuras das lâminas que variam de 10 a 50 mm para a madeira laminada e de 2,5 a 17,5 mm para a madeira folhada. As espessuras influenciam no nível de resistência das peças, que é maior para a madeira folhada. Sendo que pode ser considerado como uma das maiores causas para o maior nível de resistência alcançado pela madeira folhada, a maior possibilidade de seleção e controle dos defeitos inerentes à madeira.

Na figura 01 a seguir, é mostrado de forma esquemática dois tipos básicos de composição de madeira laminada colada.

Figura 01-Tipos básicos de madeira laminada colada



A - Laminado horizontal

Fonte: FREAS & SELBO, (1954)

B - Laminado vertical

2.2 ALGUNS ASPECTOS DA MADEIRA LAMINADA COLADA NO BRASIL

Segundo informações coletadas por MANTILLA (1989) em sua tese de doutorado, a primeira indústria brasileira de madeira laminada colada foi fundada em Curitiba - PR, no ano de 1934, a qual ainda se mantém em atividade, em Porto Alegre - RS, com o nome de ESMARA - Estruturas de Madeira Ltda. Os trabalhos de confecção e execução de projetos em madeira laminada colada da empresa, são baseados nas especificações e recomendações de normas alemãs, somadas à experiência acumulada ao longo do tempo, porém não existem publicações ou dados a respeito desta experiência.

Com relação à pesquisa, no IPT, CALLIA (1958 e 1961), publicou estudos descrevendo a tecnologia de fabricação e o comportamento da madeira laminada colada de Pinho do Paraná nas estruturas. Na Universidade Federal do Paraná, Escola de Florestas, SIMIONI (1978), defendeu uma dissertação de Mestrado com o título de "Sobre a viabilidade técnica da confecção de vigas laminadas com madeira juvenil de *Pinus elliottii engelm*". Na Escola de Engenharia de São Carlos - USP, foi apresentado por ZANDER (1979), uma dissertação de Mestrado sobre a influência de alguns fatores na resistência, dimensionamento e esquemas de

fabricação de peças de madeira laminada. Esta última instituição vem mantendo essa linha de pesquisa com estudos além da madeira laminada colada, sobre adesivos e adesividade. Dentro dessa linha de estudos, foi defendida por MANTILLA (1989), uma tese de doutoramento sobre a resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada colada.

2.3 VANTAGENS DA CONSTRUÇÃO DE PEÇAS LAMINADAS

Algumas das vantagens da madeira laminada em relação às peças estruturais de madeira maciça são as seguintes:

- Permite a confecção de peças de grandes dimensões a partir de bitolas comerciais disponíveis, muitas vezes limitadas; formando peças estruturais de qualquer seção transversal, através da união eficiente por adesivos
- Possibilita a seleção da qualidade da madeira, permitindo a utilização de madeiras de qualidade inferior em regiões de menor solicitação e madeiras de melhor qualidade para posições de maiores esforços, o que permite ainda, a utilização de combinações de espécies distintas, sem comprometer o desempenho estrutural da peça ;
- A pequena espessura das lâminas de madeira, menor que 50 mm, permite melhor controle de umidade das tábuas, além de reduzir defeitos provenientes da secagem, típicos em peças de grandes dimensões;
- Possibilita a criação de formas com efeitos arquitetônicos, variando inclusive a seção transversal conforme as regiões de solicitação no elemento estrutural;
- Possibilita um dimensionamento mais preciso e portanto com maior economia, baseado na resistência da madeira seca;

Considerando-se a flexibilidade, em termos de qualidade da matéria prima requerida na produção de vigas laminadas, quando comparadas às vigas de madeira sólida, torna-se alta-

mente justificável o estudo de sua tecnologia e análise da influência no comportamento da espécie ou da mistura de espécies de madeira nas propriedades de resistência da viga.

A maioria dos estudos realizados no Brasil, concentram suas atenções aos fatores que influem na produção e confecção de peças laminadas com madeiras de propriedades conhecidas e bem determinadas, como é o caso da *Araucária angustifolia*, porém, não são definidas classes de resistência, as quais podem determinar o desempenho das vigas laminadas de *Pinus spp.*

Comparada a outros materiais, a madeira laminada pode apresentar ainda as seguintes vantagens:

- A relação peso/resistência é baixa, podendo por esta razão, as peças serem transportadas e colocadas em serviço com baixo custo. Estudos comparativos demonstraram que para uma resistência equivalente, a madeira laminada é até cinco vezes mais leve do que o concreto;
- As grandes dimensões da seção transversal tornam a madeira laminada mais resistente ao fogo, do que as construções de aço projetadas para suportar a mesma carga. Ainda comparadas às estruturas de aço que se aquecidas a temperaturas elevadas entram em colapso, as estruturas em madeira queimam mais lentamente, resistindo à penetração do calor, pois sua combustão é muito mais lenta, variando de 0,5 a 0,7 mm/minuto;
- Apresenta excelente resistência aos materiais corrosivos;
- As fundações são consideradas leves, permitindo a pré-fabricação e assentamento com bastante redução de mão-de-obra, além de não necessitar de manutenção para utilização em interiores.

Algumas Particularidades da Madeira Laminada

Entre as principais características podem ser citadas as seguintes:

- A madeira laminada é de maior custo comparado a madeira maciça. O fator econômico envolve o adesivo, a mão de obra e a seleção da madeira;

- Durante a produção, o fator de perda é considerado elevado tanto na madeira como no adesivo, variando em torno de 13 a 33% , devido às emendas, acabamentos e considerações de projetos.

- O adesivo utilizado deve ser adequado, de acordo com o uso destinado do elemento estrutural. Como no caso de estruturas de uso externo que tem custo mais elevado.

- Para a produção de madeira laminada, é necessário equipamentos e técnicas especiais, bem como a mão de obra especializada;

- Se os elementos estruturais produzidos forem de grandes dimensões e muitas vezes, não é possível a sua produção na obra, podendo acarretar em custos adicionais de transporte, algumas vezes elevado.

2.4 FATORES ENVOLVIDOS NA PRODUÇÃO DA MADEIRA LAMINADA COLADA

A importância da utilização de madeira laminada em estruturas é a utilização racional e otimizada da madeira. Esta utilização eficiente se faz, tendo-se em vista que as tábuas podem ser de seções e comprimentos reduzidos, de baixo custo, permitindo-se ainda combinações com madeiras de qualidade diferenciada.

Segundo FREAS & SELBO (1954), a madeira utilizada na fabricação de uma peça laminada deve ser devidamente selecionada e adequadamente preparada para a colagem. Além disso, é essencial o conhecimento da intenção de uso final do produto laminado, resistência, durabilidade, propriedades de adesividade das espécies, teor de umidade e a qualidade da superfície preparada para a colagem. É necessário considerar defeitos que possam prejudicar a qualidade da colagem e que podem reduzir a trabalhabilidade do produto acabado. Algumas vezes é necessário ainda, considerar a aparência da peça acabada , quando da seleção e posicionamento das camadas de madeira.

Algumas espécies de coníferas, principalmente as espécies incluídas no grupo denominado de “Pinus do sul”, que é composto essencialmente de quatro principais espécies, *Pinus palustris*, *P. equinata*, *P. taeda* e *P. elliottii*, tem sido amplamente utilizadas nos Estados Unidos, na confecção de peças laminadas, em vigas e arcos para treliças, por apresentarem custos favoráveis, disponibilidade da madeira e capacidade de resistência necessária.

As espécies de reflorestamento no Brasil, mais especificamente na região sul, são de *Pinus elliottii* e de *Pinus taeda*, originárias da América Central e Estados Unidos, KLOCK (1989). Segundo BROWN (1952), citado pelo mesmo autor, as características de utilização destas espécies, podem ser consideradas semelhantes entre si, principalmente na utilização da madeira das espécies originárias do sul dos Estados Unidos.

2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA DA MADEIRA LAMINADA COLADA

Em muitos dos estudos realizados sobre a madeira laminada colada, considera-se que um grande número de fatores, que exercem influência sobre a resistência da madeira sólida estrutural, também pode ser aplicada à madeira laminada.

Os estudos iniciais sobre o aperfeiçoamento e aumento da resistência da madeira laminada, basearam-se na teoria de que esta poderia ser controlada através do posicionamento seletivo da qualidade das camadas de madeira numa peça, posicionando a madeira de qualidade inferior nas regiões internas, de baixa tensão, e as de qualidade superior em áreas tracionadas externas, onde são submetidas a maiores tensões.

Um dos primeiros estudos foi publicado no Forest Products Laboratory, por Wilson (1939), (apud MANTILLA, 1989), fornecendo informações básicas sobre a tecnologia da madeira laminada. Posteriormente, FREAS & SELBO (1954), realizaram uma ampla pesquisa sobre o projeto e a fabricação de peças estruturais de madeira laminada, abrangendo os fatores que influenciam na sua resistência.

ETHINGTON (1960), considerando a hipótese da disposição seletiva da qualidade da madeira na viga laminada, publicou um estudo sobre a rigidez e resistência à flexão de vigas laminadas utilizando madeira de duas espécies. Foram apresentadas equações teóricas, que foram comparadas com valores de módulos de ruptura obtidos experimentalmente. A equação tinha o objetivo de prever a rigidez e a resistência das vigas através do conhecimento de certas propriedades mecânicas das espécies. Os resultados indicaram que era possível prever a resistência das vigas compostas por duas espécies se fossem conhecidas as resistências de tração, compressão, cisalhamento e módulo de elasticidade de cada espécie. Contudo, na época a técnica demonstrou ser de difícil aplicação, principalmente devido a necessidade de longas interações de equações matemáticas, realizáveis apenas em estudos de laboratórios.

KOCH (1964), estudou a resistência de vigas laminadas utilizando a madeira de pinus do sul com alta proporção de lenho juvenil. Fazia parte do estudo, o aproveitamento da madeira de baixa qualidade, restantes da parte central das toras utilizadas para laminação, em função deste material ter difícil emprego estrutural, por outros meios convencionais de conversão. Foram estudadas vigas montadas com madeiras de pouca espessura ($1/3'' \cong 0,85 \text{ cm}$), localizando as lâminas de acordo com a sua rigidez, com o objetivo de obter vigas de resistência uniformemente alta. Os resultados indicaram que as vigas construídas por esse sistema, poderiam alcançar resistências equivalentes às vigas de montagem aleatória, confeccionadas somente de madeiras de classificação superior. Os altos valores de resistência obtidos foram atribuídos em parte devido à espessura das lâminas, bem como pelo método de montagem. Considerou-se que nas lâminas de pouca espessura, existia menor concentração de tensão e ainda permitiam melhor distribuição das características redutoras de resistência.

Um outro estudo semelhante, foi realizado por KOCH e BOHANNAN (1965), sobre a resistência da viga laminada, utilizando o mesmo material da parte central restante da tora, com a madeira da espécie de *Pinus elliottii* (26 anos), localizando as lâminas em função da qualidade da madeira nas vigas, porém, variando de acordo com a densidade, rigidez, aparência e também ao acaso. Os resultados demonstraram que a melhor resistência foi verificada nas vigas compostas pela seleção e posicionamento através da rigidez

BIBLIS (1966 e 1967), estudando sobre o aumento da resistência através da disposição seletiva das camadas de madeira em peças laminadas, realizou um trabalho utilizando a composição de mais de uma espécie de madeira, com propriedades mecânicas diferenciadas, considerando o aspecto da interação pela disposição adequada das espécies, com os locais de tensão na peça. Na prática, em função do aumento de parâmetros seletivos, dificultando seu controle, devido a variação nas espécies, observou-se ser inviável a utilização dessa técnica na industrialização.

Com o desenvolvimento da produção de vigas laminadas de todos os tamanhos, observou-se a necessidade de verificar com maior precisão os procedimentos de projeto, com relação aos efeitos dos nós e do tamanho, na resistência das vigas. BOHANNAN (1966), realizou um estudo sobre o comportamento de grandes vigas às propriedades de flexão. Nessa pesquisa o autor analisou o efeito dos nós através do conceito I_K / I_G , cujos procedimentos são indicados por FREAS e SELBO (1954), além do efeito do tamanho das peças de madeira na resistência à flexão. Os resultados experimentais obtidos, foram aproximadamente 2% maiores que a média do módulo de ruptura previsto, indicando a necessidade de novos procedimentos de projeto. Os dados obtidos para a média do módulo de ruptura previstos pelo conceito I_K / I_G , foram em torno de 50% menores que os esperados, demonstrando a necessidade de novas pesquisas para concluir sobre o efeito dos nós na resistência das vigas laminadas.

BOHANNAN e MOODY (1969), conduziram um estudo utilizando duas classes de madeira, definidas pela norma americana AITC-301, para peças estruturais de madeira, com o objetivo de obter bases para avaliação mais precisa das características de resistência à flexão de grandes vigas laminadas. Para o sistema de classificação foram empregados ensaios não destrutivos (NDT), para as camadas de madeira a serem posicionadas no lado tracionado das vigas. O método determinava a disposição das peças de madeira de acordo com o módulo de elasticidade em classes definidas de resistência. A conclusão baseada nos dados de flexão estática, demonstrou que os módulos de elasticidade das vigas foram aproximadamente os mesmos que o módulo de elasticidade calculado através da média ponderada dos valores do módulo de elasticidade do material empregado na viga.

DIBUZ (1970), estudou uma das propriedades de resistência da viga laminada, verificando o efeito do grau de delaminação no cisalhamento. Visto que as variáveis selecionadas para o estudo, foram projetadas para determinar os efeitos mais drásticos, na resistência ao cisalhamento devido às tensões internas, foi concluído que a fragilidade das linhas de cola, para os esforços internos e externos, tem muito pouco efeito na resistência ao cisalhamento de vigas, se as linhas de cola residuais forem razoavelmente boas.

Objetivando maior aperfeiçoamento na resistência das vigas laminadas, MOODY e BOHANNAN (1970), realizaram um estudo, empregando critérios combinados de classificação visual mais rigidez, da madeira posicionada nas camadas tracionadas das vigas, para comparar os resultados dos valores de resistência alcançados em trabalhos anteriores, que utilizaram apenas o sistema de classificação visual. Os resultados demonstraram um aumento de 12% no módulo de elasticidade e de 14% no módulo de ruptura das vigas construídas por esse método de classificação, como era esperado, porém a resistência mínima apresentada foi aproximadamente igual aos valores já obtidos anteriormente. Foi publicado por JOHNSON (1973), especificações da norma AITC para a camada tracionada da madeira laminada estrutural, baseado nos mesmos critérios combinados de classificação.

Estudando a resistência da madeira laminada, STRICKLER & PELLERIN (1971 e 1976), desenvolveram a técnica da prova de carga à tração, para a madeira posicionada na camada tracionada, antes da montagem das vigas. Concluíram que o método prático garantia resistências seguras, igualmente para as emendas denteadas e a madeira em si, permitindo além disso a indicação do acréscimo da tensão de trabalho da viga laminada.

A influência das emendas das tábuas e o seu posicionamento na viga laminada, tem sido considerado por diversos autores como determinantes na resistência da viga, sendo realizados estudos para verificar a eficiência de cada tipo de emenda, entre eles, FREAS & SELBO (1954), BOHANNAN e MOODY (1969), STRICKLER e PELLERIN (1971), EBY (1981) e outros. MOODY e BOHANNAN (1971), estudaram a influência das emendas relacionadas ao efeito da massa específica da madeira, concluindo que a resistência e a rigidez das vigas testa-

das não apresentavam diferenças significantes quando comparadas às vigas construídas apenas pelo critério visual de posicionamento das emendas.

Um outro fator considerado de importância, tem sido a influência dos nós na resistência das peças laminadas. Sendo desenvolvidos critérios para classificação dos nós e sua distribuição no elemento laminado, FREAS e SELBO (1954), BOHANNAN (1966), SHULER, GRANT e MOODY (1979), WOLFE e MOODY (1981) e outros.

APLIN (1972), estudou o comportamento aos testes de flexão estática de vigas laminadas de algumas espécies de pinus canadenses, para verificar a influência do sistema de classificação por rigidez da madeira na resistência das vigas laminadas. A madeira das camadas externas da viga foi classificada por rigidez e posteriormente, as vigas foram testadas à flexão de acordo com as especificações da norma canadense CSA. Ficou comprovado que a resistência da viga geralmente é governada pela resistência da madeira do lado tracionado, e que vigas confeccionadas com critérios similares irão assegurar altas tensões de carregamento e valores de módulos de elasticidade substancialmente altos. Contudo, apenas a classificação por rigidez não é suficiente para a madeira laminada, devendo ser combinado com um sistema de avaliação visual de cada tábua.

Já outros autores como PETERSON e NOZISKA (1973), estudaram a resistência à tração de peças laminadas compostas de duas a sete camadas. Foram realizados estudos sobre a influência do número de camadas (lâminas), na resistência do elemento laminado. Foi observado que a resistência mínima à tração de cada grupo, formado por tamanhos de peças compostas por múltiplas lâminas era aproximadamente igual à média da resistência à tração das lâminas individuais amostradas. As rupturas ocorreram em geral nos locais onde havia inclinação de grã associada aos nós, e principalmente devido a inclinação da grã.

BOHANNAN e MOODY (1973), num estudo sobre a evolução dos critérios de resistência da madeira laminada, concluíram que a resistência é conduzida pela localização seletiva das características de resistência dentro da seção transversal da peça e que materiais de classificação inferior podem ser usados, menos em áreas altamente tensionadas, sem afetar adversamente a suficiência estrutural de montagem das vigas. Concluíram também que, uma das prin-

cipais características redutoras da resistência é o nó, ao longo da viga com localizações de desvios de grã associado aos nós. O efeito dos nós na resistência da madeira laminada colada tem sido o objetivo de extensivas pesquisas no Forest Products Laboratory (USA), desde a década de 1930. A resistência da viga foi relacionada a um fator não dimensional, comumente chamado de I_K / I_G , uma proporção do momento de inércia da área transversal ocupada pelos nós e o momento de inércia geral da seção da viga. Contudo, os estudos de pesquisas experimentais demonstraram que o relacionamento da resistência ao fator I_K / I_G , poderiam ser determinados com maior correção se fossem incluídas algumas exigências restritivas na qualidade das camadas tracionadas.

MOODY (1974), publicou dois estudos sobre a madeira de algumas espécies de Pinus do sul, de textura grosseira (“coarse grain”), material considerado de baixa qualidade, por apresentar anéis de crescimento distintos, com diferenças consideráveis entre lenho outonal e primaveril, com menos de quatro anéis por polegada e na época, pelas especificações vigentes, sem perspectivas de utilização na fabricação industrial de vigas laminadas. Com base nos fatores de resistência da madeira, foram determinados pela análise teórica e experimental, em vigas fabricadas com a combinação de grande quantidade de material desta espécie com outras. O estudo possibilitou a viabilização do emprego desse tipo de madeira e o desenvolvimento de novas especificações sobre a madeira laminada.

Para determinar os critérios de projeto que melhor prevê os valores mínimos de resistência à flexão de pequenas vigas laminadas horizontalmente, MARX e MOODY (1981) analisaram três métodos em vigas compostas de 2, 4 e 6 camadas de madeira de classificação uniforme. Os métodos variavam segundo a forma de estimar a redução da resistência causada pelos nós, baseado nos conceitos I_K/I_G e SR. O conceito I_K/I_G já foi citado anteriormente e SR é a taxa mínima de resistência, o qual prevê diretamente a tensão de projeto, baseado na redução do módulo da seção devido aos nós. Foi verificado que o conceito da variação da taxa de resistência com a aplicação de um fator de ajuste de 0,85 poderia estimar com maior precisão a resistência de vigas laminadas com seção transversal de pequenas alturas.

MARX e MOODY (1981), realizaram um novo estudo para verificar a resistência e rigidez de pequenas vigas laminadas com diferentes qualidades de madeira nas camadas tracionadas. Foram avaliadas pequenas vigas compostas de duas espécies, para determinar a classe de qualidade necessária para obter a tensão de projeto desejada. Os resultados experimentais apresentaram as médias das resistências abaixo dos valores calculados pelas especificações da norma americana AITC, para a espécie de Pinus do sul e excederam os valores esperados para a espécie de Douglas Fir-larch.

Nos estudos realizados por diversos autores, são considerados um grande número de fatores que podem influenciar na resistência da madeira laminada, são citados por FOSCHI e BARRET (1980), que a resistência da viga laminada depende em geral de: a) A combinação particular da classe da madeira nas camadas externas da viga; b) características redutoras de resistência tais como a quantidade de nós e grã irregular permitidas em cada classe; c) o valor do módulo de elasticidade ou prova de carga de cada camada individual; d) a resistência e a localização das emendas; e) a espessura e o número de tábuas utilizadas e d) as dimensões da peça construída.

MARX e MOODY (1982), verificaram o efeito da largura e da qualidade das tábuas, na camada tracionada de vigas, com quatro camadas, na resistência à flexão. Diferenças significativas na resistência foram observadas apenas para a variação da qualidade de classe da madeira, porém, não apresentou influência do efeito da largura das tábuas. Posteriormente, MARX e EVANS (1986), conduziram um estudo para verificar a resistência à tração de uma classe específica de madeira utilizada na camada tracionada das vigas. A classe de madeira considerada mais importante na madeira laminada, foi analisada para obter características precisas de distribuição da tensão e para verificar bases de critérios para a substituição alternada de produtos de outras classes. Os dados foram substancialmente próximos aos valores mínimos correntemente usados como critérios de linha básica. Os resultados também forneceram uma linha básica para a determinação de substituições aceitáveis de outras classes de madeira, nas camadas tracionadas, além de fornecer informações necessárias para a simulação de modelos que possam prever a distribuição da resistência e rigidez da madeira laminada.

Os projetos de estruturas de madeira em geral, baseiam-se na deflexão que ela possa apresentar. As vigas laminadas são comumente empregadas em situações estruturais, como sistema de suporte onde a deformação é considerada de maior importância. A rigidez destas vigas é controlada pelo módulo de elasticidade (MOE) de cada camada de madeira e sua localização na viga. O valor de projeto do MOE para as vigas laminadas, são determinados baseados na média dos valores do MOE das tábuas de diferentes classes. Contudo, o módulo de elasticidade de uma classe de madeira tem um certo grau de variabilidade e cada viga individual pode apresentar valores de MOE, mais altos ou mais baixos do que os valores tabelados em projeto, MOODY, SOUZA e LITTLE (1988). Utilizando conceitos comuns da estatística, os autores desenvolveram um modelo para procedimentos de análise e determinação da variação destes valores do MOE, em vigas horizontalmente laminadas, fabricadas com madeiras classificadas visualmente. No estudo, foram examinadas duas formas mais típicas de combinações, utilizando duas classes com propriedades de rigidez conhecidas e que mais comumente podem ocorrer nas indústrias. Os resultados demonstraram a variação esperada no módulo de elasticidade das vigas laminadas e os procedimentos desenvolvidos indicados, para serem empregados numa formulação segura e básica dos projetos.

MOODY e FALK (1990) estudaram o relacionamento do efeito do volume nos projetos de vigas de madeira laminada, baseados na análise da resistência à flexão estática de grandes vigas. Com o objetivo de obter informações a serem adotadas nas especificações da norma AITC, por considerar ter um efeito significativo na determinação de tensões admissíveis à flexão de projeto para grandes vigas. Foram realizados um programa de testes para obter dados adicionais avaliando a aplicabilidade deste fator de projeto. Os testes da viga apresentaram resultados ajustados por um fator apropriado que contribuía na qualidade das camadas tracionadas, indicando que o desenvolvimento do fator efeito do volume funciona bem, de acordo com redução de resistência em grandes vigas laminadas. Embora esta verificação tenha sido aplicada apenas para os resultados dos testes em vigas da espécie avaliada de *Douglas-fir*, em resultados anteriores, foi demonstrado que para outras espécies não tem efeito significativo.

SOLLI, AASHEIM e FALK (1992), estudando a resistência das vigas laminadas, realizaram a caracterização e a performance de vigas laminadas construídas com madeiras de espécies de coníferas da Noruega classificadas mecanicamente, em comparação com as normas desenvolvidas pelo CEN. Os resultados indicaram alta quantidade de material classificado mecanicamente em duas classes de madeira definida pela minuta da norma CEN e que as vigas laminadas confeccionadas com este material, alcançaram os valores de resistência e rigidez requeridos na mesma norma.

Com o objetivo de alcançar altas resistências e rigidez determinadas, em madeiras estruturais laminadas com espécies de Pinus do sul, HERNANDEZ e MOODY (1992) desenvolveram um estudo para determinar critérios de combinação de classes de madeira para a camada externa, bem como seu posicionamento na viga. Os critérios foram atentamente monitorados durante a fabricação e além disso, foram coletadas amostras das emendas utilizadas, para relacionar a resistência individual das emendas à tração com a sua performance nas vigas. O resultado dessas avaliações indicaram que é possível alcançar altas resistências e módulos de elasticidade previstos em norma, utilizando esta espécie de madeira, se forem empregadas madeiras da classe de altos valores de MOE nas camadas externas e seguidos os critérios determinados de posicionamento de certas características redutoras de resistência, tais como nós e desvio de grã, na confecção das vigas.

Para verificar as resistências de duas espécies de folhosas, com uma das espécies não utilizada correntemente em construções estruturais laminadas, foram realizados estudos semelhantes ao anterior, por MANBECK, et al. (1993), em projetos de tensões em flexão e módulo de elasticidade, pré-determinados a serem alcançados. Foram avaliadas as combinações desenvolvidas dos critérios de posicionamento das classes de madeira, definidas pelo seu módulo de elasticidade. A análise determinou critérios de classes necessárias de acordo com a localização na viga, bem como dos defeitos permitidos na classificação visual, indicando ainda a possibilidade de uso da espécie para construções estruturais laminadas. Foi concluído também que os procedimentos desenvolvidos para as espécies de coníferas na norma ASTM D 3737, podem prever com precisão a rigidez das vigas e fornecem estimativas conservadoras de resistências

para as vigas confeccionadas de acordo com a taxa do módulo de elasticidade das espécies estudadas.

2.5.1 A QUALIDADE E FATORES DE RESISTÊNCIA DA MADEIRA

O conhecimento da qualidade da madeira, desde as pesquisas iniciais, foi considerado de grande importância, com influência significativa na resistência das madeiras laminadas coladas.

A adoção de critérios de classificação e do posicionamento das camadas em uma peça laminada, de acordo com a qualidade da madeira foram as principais preocupações dos pesquisadores e objetivos de muitos estudos.

O critério de classificação da madeira inicialmente utilizado para construção de peças laminadas foi a classificação visual. Posteriormente, foram desenvolvidas as formas de classificação visual-rigidez e classificação mecânica não destrutiva da madeira posicionada na camada tracionada do elemento estrutural laminado. Com a evolução das técnicas de confecção, para obter altas resistências e para o aproveitamento de madeiras de qualidades diferenciadas, foram desenvolvidos critérios de classificação por provas de carga associados ao processo de classificação visual e mecânica.

2.5.1.1 QUALIDADE DA MADEIRA

Na produção de peças laminadas coladas estruturais, os dois principais componentes são, o adesivo e a madeira. Para o adesivo, são necessárias diferentes classes e técnicas para assegurar alta resistência e durabilidade da linha de cola. Para a madeira, as propriedades gerais são conduzidas de acordo com a necessidade da engenharia e indústria, resumindo-se nas características básicas, como auxílio prático, para a melhor utilização da madeira como um material estrutural, FREAS e SELBO (1954).

Segundo os mesmos autores, a madeira é composta de muitas, minúsculas células com cavidades. A resistência da madeira pode ser atribuída a certos tipos dessas células, as quais apresenta a seção transversal aproximadamente poligonal, porém muitas vezes mais longas no sentido das fibras, ou seja na direção paralela ao eixo principal do tronco. O comprimento das células não é necessariamente uma indicação da resistência da madeira. Durante o crescimento de uma célula, uma complexa parede celular é formada, consistindo essencialmente de celulose e lignina. A combinação dessas duas substâncias pode ser comparada ao concreto reforçado, onde a celulose é o principal elemento estrutural, equivalendo ao reforço determinado pelo aço e a lignina ao concreto. As células nas coníferas são conhecidas como traqueóides, formando cerca de 90% da madeira, sendo responsáveis pela resistência do caule, CHUGG (1964).

A composição da madeira, por agregações de células vegetais, apresenta características como anisotropia, higroscopicidade e variabilidade nas propriedades mecânicas. A variabilidade da madeira decorre de diferenças anatômicas, desde a ultra-estrutura da parede celular e até mesmo por influências de posições geográficas, sendo que a fonte de variação mais significativa seja talvez a que ocorre dentro da árvore, COWN (1974). Segundo o autor, a natureza das células da madeira depende da idade real do tecido cambial, caracterizando assim, zonas distintas dentro da árvore, dependendo da posição em relação ao centro do tronco e ao topo da árvore.

De acordo com DADSWELL & NICHOLS (1960), a variação das propriedades da madeira em função da idade, deve ser considerada nos estudos relativos à qualidade da madeira.

Existem grandes diferenças nas propriedades da madeira, relativas à variação dentro das espécies e que não são totalmente conhecidas, em função da multiplicidade de causas, DUFFIELD (1961). Segundo o mesmo autor, as variações podem ser classificadas em função de dois principais fatores: fatores internos, inerentes à árvore e fatores externos, inerentes ao ambiente e a tratamentos silviculturais.

Um dos primeiros estudos, comparando tecnologicamente espécies florestais de rápido crescimento em condições brasileiras, foi conduzido para relacionar a qualidade da madeira com a produção de celulose e propriedades do papel, realizado por MORESCHI (1976).

Comparando a qualidade da madeira de Araucária com a de *Pinus* spp., produzida em reflorestamentos de dezoito anos, TOMASELLI (1979), concluiu que a densidade básica das madeiras de *Pinus elliotti*, *Pinus taeda* e *Araucária angustifolia*, era quase a mesma para as três espécies estudadas e que para os *Pinus* foram encontradas grandes diferenças na resistência à flexão entre a madeira juvenil e a madeira adulta, o mesmo não ocorrendo com a Araucária. Contudo para a madeira adulta das três espécies, tais diferenças não foram observadas, sendo que foram considerados até certo ponto surpreendentes, os valores obtidos para as espécies de *Pinus*.

Para verificar parâmetros de utilização da madeira de pinus na construção civil, foi conduzido por BORTOLETTO (1993), um estudo para indicação de seis espécies e variedades de pinus plantados no estado de São Paulo. Foram analisados os resultados das propriedades de resistência e elasticidade das madeiras de *P.caribaea* var. *bahamensis*, *P. caribaea* var. *caribaea*, *P. caribaea* var. *hondurensis*, *P. elliottii* var. *elliottii*, *P. oocarpa* e *P. taeda*. Foram determinados alguns critérios de classificação de qualidade em função dos requisitos necessários, de acordo com a utilização final.

MUNIZ (1993), realizou um estudo das principais características da madeira de *Pinus elliottii* Engelm e *Pinus taeda* L., provenientes de plantios do município de Irati no estado do Paraná. Constaram de seu estudo informações básicas sobre as propriedades físicas, qualidade e fatores que afetam os processos de transformação da madeira destas espécies. Pela análise das propriedades, foi concluído que a variação da resistência ocorre principalmente, decrescendo no sentido da casca para a medula em qualquer altura do tronco e que apresentava muito pouco decréscimo da resistência no sentido de variação da altura. Tais variações verificadas, seguiram de forma geral a tendência apresentada pela massa específica, que foi maior para o lenho adulto. Os resultados indicaram ainda que dependendo de medidas silviculturais de controle de desrama, para diminuir a conicidade e o tamanho dos nós, acompanhados de técnicas de condução dos povoamentos, podem ser obtidas maiores proporções de madeiras de qualidade para fins estruturais.

A madeira utilizada na fabricação de peças laminadas deve ser convenientemente selecionada e adequadamente preparada para a colagem, FREAS e SELBO (1954). Para o autor, é essencial o conhecimento da intenção de uso final do produto laminado, a resistência, durabilidade, propriedades de adesividade das espécies, o grau de umidade da madeira e a qualidade das superfícies a serem coladas.

A composição da simetria cilíndrica da madeira, através do crescimento de camadas concêntricas e sucessivas, reflete em muitas das propriedades físicas, elásticas e de resistência deste material em que é estabelecida a teoria elástica da madeira, considerando a hipótese desta possuir comportamento ortotrópico, Hearmon (1948), (apud KOLLMANN, 1968).

Um material que possui três planos de simetria elástica, perpendiculares entre si, é designado de sólido ortotrópico. De acordo com NASH (1922), um material ortotrópico que possui três planos de simetria elástica, em lugar de apenas duas constantes elásticas (E e ν) que definem o sólido isotrópico e que obedece a lei de Hooke, deverá ter vinte e uma constantes elásticas. A constante elástica (E) refere-se ao módulo de elasticidade, que é a relação entre a tensão e a deformação sofrida pelo material. A outra constante elástica (ν) é considerada como a resultante da relação entre a deformação transversal e a longitudinal.

2.5.1.2 FATORES DE RESISTÊNCIA DA MADEIRA

A madeira, por ser um material celular formado de traqueóides ou fibras, os quais proporcionam resistência mecânica, direcionados aproximadamente paralelos ao eixo longitudinal da árvore, ao contrário de materiais isotrópicos estruturais, suas propriedades mecânicas e elásticas não são as mesmas em todas as direções, variando com a direção da carga aplicada, a direção das fibras e a posição dos anéis de crescimento. A madeira tem três eixos mutuamente perpendiculares de simetria elástica, os quais são considerados correspondentes às direções longitudinal, radial e tangencial, CHUGG (1964). A teoria elástica da madeira baseia-se na hipótese desta possuir comportamento ortotrópico, em vista de apresentar propriedades me-

cônicas singulares e independentes nessas três direções. A ortotropia, quando usada na descrição de sólidos, refere-se à estrutura interna do material, caracterizada por três planos de simetria perpendiculares entre-si, que na madeira, a simetria considerada a nível macroscópico, existe em função do arranjo dos elementos anatômicos.

O comportamento elástico e o limite de resistência são características próprias de cada material e que nas madeiras dependem de cada espécie. A determinação destas características, pode ser obtida na prática, através de ensaios convencionais, realizados dentro de padrões estabelecidos por normas ou especificações. Em geral, os ensaios consistem na obtenção de dados da deformação correspondente à aplicação de um carregamento lento e contínuo em corpos de prova devidamente preparados e condicionados a um determinado teor de umidade.

Segundo CHUGG (1964), alguns tipos de materiais possuem consideráveis reservas de resistência entre o limite elástico e a ruptura. No entanto, essa faixa de resistência, chamada de inelástica, não deve ser considerada na aplicação da teoria de resistência das vigas de madeira, por esses valores serem muito variáveis em relação a outros materiais de construção, como no caso das estruturas de aço. PARKER (1963), já havia observado que para estabelecer-se esforços admissíveis de diferentes espécies ou classes de madeira para fins estruturais, devem ser consideradas as grandes variações que podem apresentar os valores de resistência, em testes de corpos de prova de madeira.

Existem muitas propriedades da madeira, as quais fazem dela um material estrutural ideal. A resistência ou propriedades mecânicas da madeira são aquelas que permitem medir a sua capacidade em resistir a cargas externas ou aplicadas, a choques ou esforços, os quais tenderiam a alterar sua forma ou tamanho, ou ainda causar qualquer deformação.

O termo resistência, significa a capacidade que tem um material de resistir à forças externas ou cargas, tendendo a alterar a sua forma e tamanho. Uma carga aplicada a um corpo sólido, infere um esforço interno que tende a resistir às alterações no seu tamanho e forma. Este esforço é conhecido como *tensão*, geralmente expresso em kgf/cm^2 . As alterações de tamanho e forma são conhecidas como *deformações*.

A relação entre as tensões e deformações são demonstradas através de diagramas que ilustram o comportamento do material, quando aplicado um carregamento. Quando a carga é gradualmente reduzida até zero, a deformação sofrida durante o carregamento deverá desaparecer parcial ou completamente. Esta propriedade do material, pela qual ele tende a retornar à sua forma original, é denominada de *elasticidade*. A deformação que permanece depois de retirada a carga é denominada *deformação permanente*. Não havendo a deformação permanente, isto é, se a deformação voltar a zero, o material é elástico até aquele valor atingido pela carga. Assim, pode ser determinada a tensão que representa o limite superior da região elástica, a qual é conhecida como *limite elástico*, TIMOSHENKO & GERE, (1986).

Ainda segundo os mesmos autores, os diagramas de tensão-deformação da maioria dos materiais estruturais apresentam uma região inicial de comportamento elástico e linear. Quando um material se comporta elasticamente e apresenta também, uma relação linear entre a tensão e a deformação, diz-se que é *linearmente elástico*. Esta é uma propriedade extremamente importante de muitos materiais sólidos, incluindo a madeira.

Para TIMOSHENKO (1978), os conceitos de tensão e deformação podem ser determinados de modo elementar, por meio de um teste de tração, considerando-se o alongamento de uma barra prismática de seção constante em todo o comprimento e de eixo reto. Supõe-se a barra carregada nas extremidades por forças axiais P , que produzem alongamento uniforme ou tração na barra. Fazendo um corte imaginário na seção transversal central da barra, normal ao eixo, é possível isolar parte dela como corpo livre. A força P aplicada na extremidade, traduz na reação da seção transversal seccionada. Tais forças estão distribuídas uniformemente sobre toda a seção transversal (A). A força por unidade de área é denominada *tensão*, sendo comumente designada pela letra grega σ . Supondo que a tensão seja uniformemente distribuída sobre toda a seção transversal, pode-se concluir que a resultante é dada pelo produto da intensidade de σ pela área A , da seção transversal da barra. Assim,

$$\sigma = P/A \quad (\text{equação 2.01})$$

que é a equação para a tensão uniforme numa barra prismática. Esta equação mostra que a unidade que mede a tensão é uma força dividida por unidade de área (kgf/cm^2).

A relação linear entre a tensão e a deformação da barra prismática, pode ser expressa pela equação:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{equação 2.02})$$

onde, o E é uma constante de proporcionalidade conhecida como *módulo de elasticidade* (MOE) do material. Esta constante é o coeficiente angular da parte linear do diagrama tensão-deformação e é diferente para cada material.

Ao ser aumentada a carga estática, a barra irá se alongando até o valor total δ , que é o alongamento total. Assim, o alongamento por unidade de comprimento ε , ou seja, o alongamento relativo, denominado *deformação unitária*, é calculado pela equação:

$$\varepsilon = \delta / L \quad (\text{equação 2.03})$$

onde L é o comprimento total da barra, e δ o alongamento total de uma barra que suporta uma força axial. Nos cálculos, as tensões e deformações de tração são, em geral, consideradas positivas, enquanto que as de compressão são negativas.

Num gráfico de tensão-deformação de materiais considerados, dentro de certos limites, como corpos elásticos, como o aço, a madeira e o concreto, pode ser observado que até uma certa grandeza de ε , se apresenta como uma reta ou, pelo menos se conhece o declive da tangente no início. A idealização e generalização aplicável a todos os materiais da lei, conhecida como Lei de Proporcionalidade é devida a Robert Hooke (1676). Esta lei pode simbolizada pelas expressões:

$$\sigma = \frac{\delta \cdot E}{L} = E \cdot \varepsilon \quad \text{ou:} \quad \delta = \frac{P \cdot L}{E \cdot A} = \frac{\sigma \cdot L}{E} \quad \text{ou:} \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (\text{equação 2.04})$$

e significa que a tensão é diretamente proporcional à deformação e à uma constante de proporcionalidade E . Essa constante E tem a denominação de módulo de elasticidade ou módulo de Young, COSTA (1974).

Como ε é um coeficiente, E terá unidade de σ . Graficamente o valor de E é interpretado como o declive da reta de proporcionalidade. Fisicamente representa a rigidez do material sob a ação de uma carga. Sendo portanto, ε igual a função de σ , podendo-se admitir a expressão:

$$\varepsilon = \alpha \cdot \sigma \quad (\text{equação 2.05})$$

onde, α é o coeficiente de dilatação elástica, semelhante ao tratamento adotado na Física para tensões de dilatação térmica: $\varepsilon_t = \alpha_t \cdot \Delta t$ e $E = 1/\alpha$. Assim, foi apresentada por Bülfinger a seguinte equação exponencial:

$$\varepsilon = \alpha \cdot \sigma^m \quad (\text{equação 2.06})$$

onde, α é o coeficiente de deformação e o m , uma constante de aproximadamente uma unidade, específica para cada material, que no caso da madeira é fixado no valor igual a 1.

O limite de proporcionalidade na madeira é considerado diretamente relacionado com a elasticidade, ou seja, a sua capacidade em retornar à forma inicial, total ou parcial, quando retirado o carregamento. As tensões são diretamente proporcionais às deformações e ao carregamento aplicado, e o diagrama é linear, até atingir um ponto em que esta proporcionalidade deixa de existir. Além deste ponto, denominado de "Limite de Proporcionalidade", as deformações crescem mais rapidamente do que as tensões, quando qualquer incremento de carga é suficiente para provocar uma deformação irreversível.

Portanto, o módulo de elasticidade é uma medida de rigidez e não de resistência, sendo relacionada aos esforços de tensão e, aplicável apenas dentro do limite elástico, geralmente calculado para madeiras, em testes de flexão estática, para determinar a deformação em peças sujeitas à flexão. A tensão máxima calculada, que ocorre com a ruptura da viga, sob lento carregamento aplicado, é conhecido como módulo de ruptura, CHUGG (1964)

De acordo com WANGAARD (1950), dependendo do esforço solicitante a que é submetida a madeira, a elasticidade pode ser determinada por diversos tipos de testes, estáticos ou

dinâmicos. No teste de flexão estática, em vigas simplesmente apoiadas, com cargas aplicadas no centro do vão, uma das resistências observadas pode ser numericamente expressa pelo módulo de ruptura (MOR) e pela fórmula:

$$\text{MOR} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (\text{equação 2.07})$$

onde: MOR = módulo de ruptura, (kgf/cm²)

P = carga máxima aplicada, (kgf)

L = distância entre apoios, (cm)

b = largura da viga, (cm)

h = altura da viga, (cm).

2.5.2 A CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA PARA PEÇAS LAMINADAS

O controle de qualidade da madeira, das camadas posicionadas no lado tracionado, das vigas de madeira laminada é de significativa importância na sua resistência e desempenho estrutural.

Desde as primeiras pesquisas publicadas pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos por FREAS e SELBO (1954), sobre a fabricação e projeto de peças estruturais de madeira laminada, foi demonstrada a necessidade da classificação prévia do material, pelo conhecimento da qualidade de cada camada componente da madeira laminada, definindo especificações sobre os fatores básicos de classificação, bem como uma forma de separação e marcação adequada de cada peça de madeira. Foram determinados também os parâmetros devido aos defeitos como nós e desvios de grã, as limitações de tensão de cada classe e o cuidado com a sua distribuição na peça laminada.

ETHINGTON (1960), em seu estudo sobre rigidez e resistência à flexão de vigas laminadas compostas de duas espécies de madeira, onde comparou valores obtidos experimentalmente com valores teóricos de fórmulas desenvolvidas, realizou seus estudos baseado no co-

nhecimento das propriedades de classe de qualidade da madeira utilizada, onde foram apresentadas as equações teóricas que pudessem prever a rigidez e a resistência à flexão das vigas.

A partir de uma série de ensaios, Madsen (1962) (apud MANTILLA 1989), concluiu que em uma viga de madeira laminada, a ruptura pode ter origem na camada tracionada, geralmente quando ocorre grã inclinada que termina na borda da lâmina, e que quando a ruptura tem início em um defeito na borda da lâmina tracionada, esta continua através da viga, em forma de rachadura, conduzindo-a ao colapso.

CHUGG (1964), em sua publicação sobre a teoria e prática da fabricação de madeira laminada colada estrutural, como um dos objetivos de propor uma forma de realizar uma classificação que assegurasse maior precisão, abrangendo espécies variadas, analisou com detalhes as diferenças entre as normas de classificação para peças de madeira sólidas e as tábuas usadas na montagem de elementos laminados. Foram comparadas especificações de normas americanas de classificação visual, de algumas espécies, com as especificações da norma canadense - CSA, especificações da norma suíça e de normas britânicas, para classificação por unidade de tensão admissível, para a madeira laminada estrutural.

Nos testes realizados por BOHANNAN (1966), em grandes vigas laminadas, isentas de defeitos, foram verificadas a influência dos nós através de comparações dos valores dos módulos de ruptura. Os resultados da pesquisa conduziram a novos procedimentos de projeto e a necessidade de maiores informações que pudessem indicar com maior discernimento a avaliação do efeito das características dos tipos de nós.

Em 1967 foi publicada uma das primeiras especificações americanas, para a madeira laminada, pela American Institute of Timber Construction, indicada como AITC 301-67, baseado na classificação visual, a qual exigia apenas uma classificação estrutural da madeira. As especificações com relação aos fatores característicos de redução de resistência, foram proporcionalmente aperfeiçoados e atualizados, de acordo com os resultados de trabalhos experimentais de pesquisa desenvolvidos. Nesses estudos experimentais baseados nas especificações da AITC, foram observados em vigas que apresentavam baixas resistências, a existência de

desvios na direção das fibras, efeito do tamanho dos nós e a presença de regiões com madeiras de baixa massa específica, tais como medula e alburno, como principais causas de ruptura.

Baseado nos estudos de Johnson (1968 e 1971) (apud JOHNSON, 1973), foi publicada pela AITC as especificações para a madeira laminada, empregando testes não destrutivos somados à classificação visual das tábuas.

Os primeiros critérios de classificação da madeira para peças laminadas foram visuais e visuais-rigidez. Posteriormente, objetivando maior precisão e melhor aproveitamento da madeira, foram propostas novas técnicas de classificação mecânica não destrutiva, para a camada de madeira tracionada das vigas. Nos últimos anos, com a preocupação do melhor aproveitamento do material e da qualidade das camadas tracionadas, tem-se optado pela utilização de provas de carga em conjunto com critérios de classificação visuais e mecânicos, ROSS e PELLERIN (1994).

2.5.2.1 A CLASSIFICAÇÃO VISUAL DA MADEIRA

As especificações que fundamentam a classificação visual baseia-se na determinação da quantidade e da dimensão dos defeitos visíveis, individuais ou combinados. A tipificação dos defeitos permissíveis em cada categoria, em função da redução determinada na resistência das peças, em comparação com a resistência de peças idênticas isentas de defeitos, depende do método e das especificações utilizadas

A classificação das peças de madeira para fins estruturais, baseia-se no princípio da avaliação do nível de influência dos defeitos redutores de resistência, expressos como percentagens de resistência, em comparação com peças isentas de defeitos. A classe de qualidade ou categoria, é definida conforme a presença máxima de defeitos permitidos pelas especificações.

A norma brasileira NB-11, ABNT (1951) - Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira, estabelece duas categorias de madeiras para emprego estrutural, dentro do critério de redu-

ção da resistência devido aos defeitos, porém, não cita especificações de classificação dos defeitos, determinando apenas alguns parâmetros, como transcritos a seguir:

1. “As peças classificadas de acordo com as especificações referidas como de 2ª categoria, terão seus defeitos máximos permissíveis fixados de tal maneira que os características mecânicas sejam iguais a 60% dos valores correspondentes, obtidos em pequenos corpos de prova isento de defeitos”.

2. “Em casos especiais, poderão ser especificadas peças altamente selecionadas, classificadas como de 1ª categoria com característicos mecânicos iguais a pelo menos 85% dos obtidos nos pequenos corpos de prova isentos de defeitos”.

Na norma brasileira, que regulamenta os procedimentos de uso da madeira e de suas aplicações em estruturas, NBR 7190, ABNT (1982), não são estabelecidas ainda as especificações para a classificação visual, recomenda apenas, citando em nota de rodapé, que a classificação das peças, devem ser feitas provisoriamente, de acordo com os critérios do Boletim 185, do Forest Products Laboratory.

A norma americana ASTM D 245 - parte 22, que baseia-se no antigo boletim de nº. 185 do Forest Products Laboratory, “Guide to the Grading of Structural Timbers, 1934”, onde são fixadas as limitações dos principais defeitos para três classes de peças estruturais, define as dimensões nominais e os requisitos de utilização necessários de cada uma dessas classes, que são:

a) vigas e longarinas: são peças retangulares com seções transversais de aproximadamente 12,5 x 20 cm, ou mais, classificadas principalmente para resistirem aos esforços de flexão, quando o carregamento é aplicado em sua face menor;

b) caibros e pranchas: peças retangulares com seção transversal variando na espessura de 5 a 10 cm x 10 cm, ou mais de largura. que são classificadas para resistirem a esforços de flexão, tanto na face maior, como na face menor;

c) postes e colunas: são peças quadradas com seção transversal de 10 x 10 cm ou mais, que são classificadas principalmente para resistirem a esforços de compressão, embora possam ser utilizadas para outros fins estruturais, onde a flexão não seja a solicitação predominante.

Os defeitos máximos permissíveis para estas classes são especificados de acordo com uma determinada categoria de resistência. As categorias de resistência, dentro de uma classe são determinadas pelo nível de resistência, as quais variam de 50% a 100% em relação à madeira verde isenta de defeitos. Portanto uma determinada peça com capacidade de resistência de 75% aplica-se a uma categoria na qual a redução máxima da resistência compara-se a 25% da madeira verde isenta de defeitos. Assim, as especificações conduzem na medida da redução máxima da resistência da madeira verde isenta de defeitos, estabelecendo o defeito máximo permissível nas categorias de resistência em função do tipo de solicitação para a qual a peça se destina.

Em quase todas as normas de outros países, são fixados valores máximos permissíveis em cada categoria. Como no caso da norma alemã que classifica a madeira em três categorias:

- a) alta resistência;
- b) resistência comum;
- c) baixa resistência.

E indica os defeitos permissíveis em cada categoria da madeira resumindo em tabelas, onde são fixados os parâmetros dos seguintes fatores de classificação:

- a) diâmetros dos nós, em função de sua localização;
- b) quantidade de nós, definida pela soma de seus diâmetros, em comprimento determinado da peça;
- c) inclinação das fibras.

As normas brasileiras que regulamentam o uso das estruturas de madeira, mantêm-se inalteradas desde 1951, recomendando como critério de classificação de peças de madeira, apenas a utilização do boletim 185 do Forest Products Laboratory, enquanto não existirem especificações brasileiras. Além disso, a adoção do "boletim 185" como critério para a classificação visual de madeira brasileiras, é totalmente inviável, visto que as condições de clima e solo determinam diferenças nas características de crescimento da árvore, específica de cada região, FURIATI (1981).

Para KLOOT e LEICESTER (1977), a classificação das peças de madeira pela seleção visual depende da correlação entre sua resistência à flexão e a medição dos tamanhos de vários defeitos na superfície da peça. Esta correlação em geral não tem alto índice de correspondência, então no estabelecimento de uma classe particular de tensão que é amplamente variada, um fator seguro baseado no grau de correlação deve ser incorporado para assegurar que não mais do que uma em cem peças possam não resistir à tensão, abaixo da classe de tensão determinada.

Por uma série de recomendações, CHUGG (1964), indica os critérios de avaliação visual dos defeitos permissíveis, que determinam a qualidade da madeira a ser utilizada em peças laminadas:

- a) Fendas e rachaduras: são permitidos defeitos paralelos à face maior da tábua, até uma profundidade de $\frac{1}{4}$ da espessura da tábua;
- b) Empenamentos: ou torceduras em arco, de até 1,3 cm a cada 30 cm são permitidos;
- c) Curvatura Lateral: são permitidos até 0,7 cm a cada 30 cm;
- d) Furos: pequenos e rasos são permitidos se forem ocasionais;
- e) Nós: nós sólidos e firmes, soltos ou furo de nós, em qualquer lugar da peça, são permitidos desde que não ultrapassem determinadas dimensões em relação à largura da peça, dependendo da classe A, B, C ou D da madeira, como é mostrado na tabela 01:

Tabela 01 Tamanho máximo dos nós, de tábuas classificadas para peças laminadas

Largura Nominal das Tábuas (polegada) - cm	Dimensão dos nós (polegadas)			
	CLASSES			
	A	B	C	D
(4") - 10,16	0,952	2,223	3,175	4,127
(6") - 15,24	1,270	3,492	5,397	6,667
(8") - 20,32	1,905	4,445	7,302	8,890
(10") - 25,40	2,223	5,715	9,207	11,430
(12") - 30,48	2,857	9,525	11,113	13,970

Fonte: CHUGG, (1964).

Dois ou mais dos nós maiores, podem aparecer numa tábua sempre que a distância entre a medida do centro da tábua, seja igual ou superior a largura. Posteriormente foram desenvolvidos muitos critérios e técnicas para determinar a influência dos nós em função da sua distribuição nas tábuas, entre eles BOHANNAN e MOODY (1973) e CURRY (1974).

Foi publicado por JOHNSON (1973), uma pesquisa para avaliar a eficiência da classificação visual da madeira de vigas laminadas, construídas pelas especificações americanas, denominadas AITC-301-20, AITC301-22 e AITC-301-26. Os resultados demonstraram que as vigas apresentavam as resistências indicadas nas especificações, desde que para a madeira situada nas regiões de alta tensão houvesse uma rigorosa seleção.

Um conceito teórico foi desenvolvido e experimentalmente avaliado por MOODY (1974), permitindo a combinação de diferentes espécies de madeira em uma viga laminada colada. Foram confeccionadas pela classificação visual, com uma das espécies compondo as camadas externas e a outra a parte interna das vigas. Os resultados indicaram que quantidade substancial de madeira de baixa resistência e rigidez podem ser empregados nas camadas internas das vigas laminadas, sendo detectado efeito muito pequeno na resistência e rigidez.

2.5.2.2 A CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A RIGIDEZ E A APARÊNCIA

Na maioria dos sistemas de classificação visual presume-se que a rigidez de uma espécie em particular é constante para todas as classes. Consequentemente, para todas as classes são admitidos o mesmo módulo de elasticidade. Na classificação mecânica por outro lado, é fixada para cada peça separadamente, levando em consideração o efeito combinado dos defeitos e das propriedades inerentes da madeira isenta de defeitos de cada peça, através de uma série contínua de vãos relativamente curtos. Embora grandes defeitos possam causar maior deformação do que um defeito reduzido, quando contido em um material de rigidez similar, com carregamento sobre um pequeno vão, os efeitos são locais e não tem virtual influência na deflexão total da viga, SUNLEY e HUDSON (1964).

Segundo os mesmos autores, são admitidos que os defeitos tem pequena influência na rigidez sobre os vãos onde a deflexão é que deve ser considerada de importância. E visto que a classificação visual não leva em consideração os efeitos das propriedades da madeira, exceto pela contagem aproximada dos anéis de crescimento, é passível que ela admita igual módulo de elasticidade para todas as classes.

Para HILBRAND e MILLER (1966), o significado físico da rigidez é a resistência de uma peça estrutural de acordo com a deformação apresentada, sob a ação de um sistema de forças. A flexão é definida como o produto do módulo de elasticidade pelo momento de inércia da peça. Pois existem outras formas de rigidez, expressos de forma análoga, tais como a dureza, que é definida para outros sistemas de força. O ponto importante é que a rigidez é uma função do módulo de elasticidade e da dimensão da seção transversal da peça estrutural.

Ainda de acordo com os mesmos autores, a correlação entre a resistência e o módulo de elasticidade entre as diversas variáveis possíveis estudadas, o módulo de elasticidade à flexão, E , tem demonstrado ser um bom indicador da resistência à flexão ou módulo de ruptura. A análise estatística por regressão dos dados obtidos em madeiras dos Estados Unidos e Canadá indicaram altos coeficientes de correlação. Estudos realizados em vários outros países como a Austrália e a Inglaterra indicaram resultados similares, SUNLEY e CURRY (1962) e BOOTH (1964).

De acordo com HOYLE (1961), o módulo de elasticidade em flexão, tem sido referido como o melhor parâmetro estimador da resistência da madeira, embora existam outras variáveis que possam ser empregadas. O nível de relacionamento entre o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura, verificado em quatro espécies comerciais dos Estados Unidos, indicaram significativos coeficientes de correlação, todos entre 0,7 e 0,8 demonstrando um importante relacionamento linear entre as duas variáveis. O coeficiente de correlação igual a uma unidade significa um perfeito relacionamento entre as variáveis.

Em um outro estudo publicado por HOYLE (1968), é discutido o fato de ter sido aplicado pela prática comum, aceitando a idéia de que a elasticidade é constante para as várias classes da madeira de seleção visual-tensão. Segundo o autor, tal prática e aplicação tem sido

repetidamente comprovados serem errôneas. Estas noções generalizadas foram toleradas antes de se ter grande quantidade de informações dos testes comerciais de classificação realizados. Muitos pesquisadores tem apresentado trabalhos indicando o fato de que as propriedades elásticas da madeira são relacionadas com a classe de tensão, entre eles FREAS e SELBO (1954), HOFSTRAND e HOWE (1960), MILLER (1962), JAMES (1964), KRAMER (1964), JOHNSON (1965), LITTLEFORD (1965), PELLERIN (1965), DOYLE e MARKWARDT (1966) e outros.

OROSZ (1968) em um estudo para determinar alguns parâmetros para a previsão da resistência da madeira estrutural, demonstrou que alguns estimadores não poderiam ser efetivos e que, em tais casos, algumas características de pequenas amostras da madeira isenta de defeitos, como os módulos de ruptura, de elasticidade e peso específico podem fazer razoável previsão da resistência. Sendo portanto sugerido a utilização de mais variáveis de classificação e combinações de funções capazes de melhor predizer a classe de tensão da madeira, do que apenas pelo módulo de elasticidade ou proporção de resistência em si.

Através de um estudo realizado WALTERS e REISS (1977), em 1200 pequenas amostras isentas de defeitos, de duas espécies de coníferas, foram correlacionados o módulo de ruptura com o módulo de elasticidade e calculadas as equações de regressão linear para cada espécie. A inclinação da linha de regressão foi a mesma para as duas espécies diferindo apenas, no ponto de interseção com a reta Y devido a diferença de densidade da madeira entre as espécies. O coeficiente de correlação, de 0,644 para uma espécie e de 0,714 para a outra, foi considerado significativo ao nível de 0,001 de probabilidade. Foi concluído pelos autores, haver um relacionamento linear entre o módulo de ruptura e o de elasticidade. Concluíram também que a classificação visual especificada na ASTM 245, não é precisa, ou seja, tão segura quanto a classificação mecânica desenvolvida a partir de testes não destrutivos.

Gerhards (1979) (apud ATHERTON, 1980), propôs um modelo de estudo sobre danos cumulativos, para avaliar os efeitos relacionados ao tempo de carregamento na resistência da madeira. Este modelo foi desenvolvido para predizer a fração residual teórica do tempo de vida útil e a resistência teórica residual da resistência, de uma peça de madeira, proporcionan-

do um conhecimento do histórico do carregamento e o nível de tensão para o qual a madeira foi submetida. Os resultados demonstraram uma ótima aproximação, estimando os danos quando os níveis de tensão estão próximos do limite proporcional e o tempo de carregamento está na ordem de segundos.

Diferentes técnicas foram utilizadas para a determinação do módulo de elasticidade da madeira empregada nas peças laminadas. Os métodos utilizados para obter dados do E, podem ser colocadas em duas categorias gerais, através de testes estáticos e de medição automatizada. O sistema de medição automatizado, também denominado método não destrutivo de ensaio (NDT), é utilizado de duas formas, o teste contínuo das tábuas (CLT) e o E-computer. A determinação do E através deste último método está baseado na frequência de vibração natural da peça, medida sobre um vão próximo ao comprimento total da peça. O ensaio contínuo consiste no emprego da máquina comercial de classificação “stress-grading-machine, MSR”, onde o E é determinado a partir da medição do E mínimo e da média dos módulos de elasticidade, determinados em pequenos vãos sucessivos ao longo das peças, indicando diferentes categorias das tábuas. ROSS e PELLERIN (1991). A determinação do E por testes estáticos tem utilizado o ensaio de flexão, com aplicação de uma carga concentrada no meio do vão, entre dois apoios simples e também com a carga aplicada em dois pontos simétricos em relação ao meio do vão, sendo os deslocamentos medidos no meio do vão, WOLFE e MOODY (1981).

KOCH (1964), realizou um dos primeiros estudos relacionados ao uso do módulo de elasticidade na localização das lâminas em uma viga de madeira laminada. Foram utilizadas na sua pesquisa, lâminas com espessuras variando de 0,42 a 0,84 cm, para compor vigas de aproximadamente 46,0 cm de altura. As camadas externas foram compostas por lâminas de maior rigidez, decrescendo gradualmente os valores para as camadas centrais, até a linha neutra. Os resultados do método apresentaram significativo acréscimo na resistência e rigidez das vigas.

Nos estudos realizados por KOCH e BOHANNAN (1965), foram comparados os valores de resistência de vigas laminadas produzidas com madeira de uma plantação próxima à Alexandria, da espécie de *Pinus elliottii* Engelm, em função dos sistemas de classificação. A

madeira inicialmente dividida em quatro grupos aleatórios foi selecionada em cada grupo, de acordo com os valores da densidade, da rigidez (E), da aparência visual e ao acaso. No grupo selecionado em função da densidade, foram dispostas as madeiras com massa específica mais alta nas camadas externas da viga. Sendo que a madeira mais densa foi posicionada na camada tracionada, a madeira com o nível de densidade seguinte na camada comprimida e assim sucessivamente posicionadas no interior da viga, de forma que a madeira de menor densidade ficasse localizada na parte central. Os procedimentos foram os mesmos para o arranjo de acordo com a rigidez, exceto que a disposição foi em função do módulo de elasticidade. Nas vigas montadas de acordo com o critério de seleção visual, a lâmina que apresentava menos nós foi posicionada na camada tracionada, a segunda mais livre de nós na camada comprimida e assim a madeira com maior área de nós aceita na classificação foi centralizada. No grupo aleatório remanescente, a madeira foi selecionada e posicionada ao acaso.

Os resultados demonstraram que as vigas montadas de acordo com a rigidez apresentaram maiores valores de resistência e rigidez, em torno de 31% mais altos do que as vigas compostas aleatoriamente e os valores da média do módulo de ruptura aumentaram em 54%. A sequência dos outros melhores resultados foram a classificação visual, seguida pela disposição de acordo com o massa específica e por último as vigas montadas aleatoriamente.

Em um estudo experimental conduzido por MOODY e BOHANNAN (1970) para verificar o efeito da utilização do módulo de elasticidade suplementada pela classificação visual como critério para o posicionamento das camadas de madeira nas vigas laminadas coladas de “southern pine”, foram construídos e ensaiados à flexão, dois grupos de vigas grandes. Os módulos de elasticidade das tábuas foram determinados pelo método não destrutivo, utilizando a técnica da frequência de vibração. E a classificação visual para a seleção, pela qualidade mínima da madeira nas camadas tracionadas, foram realizadas pelas especificações da AITC 301-67. Os resultados dos testes de flexão foram comparados aos dados obtidos em um estudo anterior (FPL 113), sobre vigas construídas apenas com as especificações da classificação visual AITC 301-67. A média do módulo de elasticidade das vigas confeccionadas utilizando o critério visual-rigidez foi 12% maior que o das vigas construídas apenas com o critério visual

e a média do módulo de ruptura foi maior em 14% , conforme a expectativa teórica de acréscimo no módulo de elasticidade. Contudo, a resistência mínima apresentada nos dois grupos, foi aproximadamente igual.

Num programa de pesquisa, realizado por Johnson (1969) (apud MOODY e BOHANNAN, 1971), foram ensaiadas à flexão, grandes vigas laminadas construídas com as tábuas classificadas pelo método não destrutivo (NDT), dispostas de acordo com o módulo de elasticidade determinado através da técnica de vibração e pela classificação visual das camadas tracionadas. Os valores do módulo de elasticidade das vigas foram maiores que os valores médios dos módulos de elasticidade das madeiras utilizadas para a confecção das vigas, sendo concluído que tais valores podem ser previstos pelo método de classificação não destrutiva.

Para determinar os efeitos do posicionamento da madeira nas vigas, pelo critério de classificação em função do peso específico em adição ao critério visual, MOODY e BOHANNAN (1971), como parte dos estudos de reavaliação dos critérios de projeto da madeira laminada colada, verificaram em cooperação com grupos de indústrias madeireiras, as propriedades de flexão de cinco vigas laminadas grandes de “southern pine”. Os resultados indicaram que a resistência e a rigidez das vigas não foram significativamente diferentes das vigas, cujas camadas foram posicionadas apenas pelo critério visual.

APLIN (1972), realizou um estudo verificando a resistência à flexão de vigas laminadas coladas construídas com madeira de “eastern spruce” originárias da região de Liverpool. A madeira das camadas externas foram classificadas de acordo com a rigidez. E também, em vista das tensões indicadas para a madeira e para a viga laminada de algumas espécies de pinus canadenses, serem consideradas demais conservadoras, em função da tensão de serviço estar baseada na baixa resistência de amostras isentas de defeitos de outras espécies. O estudo objetivou aumentar os valores correntes das especificações da norma CSA, e indicar a resistência das vigas produzidas comercialmente. Foram construídas e ensaiadas à flexão 32 vigas, com a madeira classificada pelo método não destrutivo, através de uma máquina comercial de classificação (MSR). Sendo que as madeiras de maior rigidez, destinadas à camada tracionada, foram ainda selecionadas pelo critério visual. Os resultados sugeriram que vigas de alta resistên-

cia e alta rigidez poderiam ser fabricadas, utilizando o critério de classificação por rigidez. Porém, foi verificado que a classificação por rigidez apenas, não é suficiente e que deve ser combinado com uma avaliação visual de cada tábuia, garantindo altas tensões admissíveis à flexão e módulos de elasticidade substancialmente altos.

Em uma das principais pesquisas, onde foram baseadas as especificações publicadas pelo American Institute of Timber Construction (AITC), realizada por JOHNSON (1973), em linhas gerais, sobre o uso mais eficiente da madeira para vigas laminadas através do emprego de testes não destrutivos adicionados da classificação visual. Foram feitas avaliações para novas especificações, de algumas espécies de madeira anteriormente excluídas das especificações das indústrias, como matéria prima para peças laminadas. Segundo o autor, o teste não destrutivo (NDT) da madeira é um termo geral que indica que certas propriedades foram avaliadas sem causar danos à peça testada. São incorporadas limitações específicas visuais, como suplemento para cada método NDT. Geralmente, as peças são flexionadas ou vibradas para determinar a rigidez, a qual é utilizada para prever propriedades, como a resistência à flexão ou à tração. Pelos dados da pesquisa foi concluído que vigas laminadas coladas com valores previsíveis de módulo de elasticidade (E) podem ser projetados se for determinado o E da madeira utilizada.

Nos dados determinados por MOODY (1974), pela avaliação destrutiva de vinte vigas, com base nos fatores de resistência da madeira de “southern pine”, de textura grosseira, baixa massa específica, com menos de quatro anéis por polegada e sem utilização anterior na produção de madeira laminada colada, pelas normas comerciais americanas. A madeira foi classificada e posicionada de acordo com a densidade e aparência. Foram determinadas três classes de densidade: anéis delgados (D) com mais de seis anéis por polegada, anéis médios (MG) com mais de quatro anéis por polegada e anéis espessos (CG) com menos de três anéis por polegada. Todo o material foi selecionado visualmente, com a madeira das camadas tracionadas classificadas segundo as especificações da AITC 117-71. Os testes de flexão das vigas, com qualidade mínima da madeira nas camadas tracionadas, revelaram a necessidade de procedimentos de controle de qualidade destas camadas, além de concluir que devem ser modificadas as emendas, quando são utilizadas quantidades significativas de material de baixa massa espe-

cífica. Em comparação com as combinações de madeira laminada existentes, até então praticados, os valores de resistência à flexão e rigidez determinados foram levemente reduzidos e substancialmente reduzidos os valores de resistência ao cisalhamento.

Para verificação da classe de madeira, a ser posicionada no lado comprimido da viga, determinar a possibilidade de redução na qualidade, sem alteração significativa nos valores de resistência de projeto e para estabelecer procedimentos analíticos para incorporação de madeira classificada pelo módulo de elasticidade (E-rated lumber), nas vigas laminadas, MOODY (1977), avaliou 120 vigas de madeira laminada, comparando procedimentos de projeto de vigas totalmente feitas de madeira classificada visualmente. Os resultados, considerando os valores absolutos de resistência das vigas utilizados no estudo, indicaram que um número maior de rupturas ocorreram no lado comprimido das vigas, porém não afetaram na média da resistência mínima de projeto. E os procedimentos utilizados, para projetos de vigas laminadas com madeira visualmente classificada podem ser extensivos para vigas projetadas com valores de E, determinado para camadas externas, pois os valores de tensão determinados são um pouco mais altos para a mesma classe de qualidade definida como densa na classificação visual.

Utilizando tábuas obtidas de árvores de pouco diâmetro de uma espécie de pinus americano, "Lodgepole pine", TICHY e BODIG (1978), verificaram através das propriedades de flexão das vigas laminadas que os valores estimados de unidade de tensão admissível, excederam a maioria dos requisitos para a classe de seleção estrutural de quase todas as espécies de coníferas. As tábuas foram selecionadas em três classes de qualidade, de acordo com o módulo de elasticidade, determinado pelo método da flexão estática e posicionadas seletivamente na viga.

SOLLI, AASHEIM e FALK (1992), verificaram a classe de resistência da madeira e das vigas laminadas produzidas com madeira da espécie de *Picea abies* da Noruega, referida na

Europa dentro da classificação geral como “European whitewood”. Os valores do módulo de elasticidade da madeira, com prévia classificação visual industrial, foram determinados através de classificador mecânico, e comparados com os valores requeridos pelas classes de madeira determinados pela norma CEN. A classificação da madeira indicou maior concentração em duas classes de alta resistência e cerca de 50% em outras classes. Com o material definido nas duas classes de maior resistência, foram produzidas três diferentes tipos de vigas laminadas horizontalmente, sendo duas composições homogêneas e uma combinação das duas classes. As vigas foram testadas em flexão de acordo com a ISO 8375, sobre um vão de 5,40 m com 1,80 m entre pontos de aplicação da carga. O módulo de elasticidade das vigas foi medido na região livre de cisalhamento, entre os pontos de aplicação da carga, sobre o vão de 1,50m, utilizando transdutores eletrônicos. Além disso, foi concluído que os modelos de vigas laminadas construídas através dessa classificação podem alcançar ou exceder a resistência e rigidez requerida para a classe de vigas determinada pela norma do Comitê Europeu de Normatização - CEN.

Embora a resistência média de algumas espécies sejam as mesmas, reagem diferentemente na prova de carga à tração, STRICKLER e PELLERIN (1976). Os autores observaram que o método convencional de classificação visual não poderia selecionar com precisão a madeira de acordo com a rigidez ou propriedades de resistência e que os projetos por rigidez e por tensão de trabalho admissível poderiam ser melhorados se fosse utilizado um método mais preciso de classificação da madeira da camada tracionada. Sendo o material com propriedades superiores, utilizado estruturalmente com melhor aproveitamento.

ROSS e PELLERIN (1994), realizaram uma revisão sobre diversos estudos desenvolvidos durante mais de 30 anos, sobre técnicas de avaliação não destrutiva para produtos de madeira, sintetizando informações básicas de várias pesquisas publicadas. Segundo os autores, por definição, a avaliação não destrutiva dos materiais é a ciência de identificação das proprie-

dades físicas e mecânicas de uma peça do material, sem alterar sua capacidade de uso final. Tais avaliações se baseiam em técnicas de testes não destrutivos (NDT) para estabelecer informações precisas concernentes às propriedades, desempenho ou condição do material em questão. Historicamente, a comunidade de produtos florestais tem desenvolvido e usado técnicas NDT, quase exclusivamente para seleção ou classificação de produtos estruturais. Dois principais exemplos são, a máquina de classificação por aplicação de carga na madeira (MSR) e o classificador ultrasônico de chapas de madeira.

Segundo os mesmos autores, a hipótese fundamental do teste não destrutivo do material madeira, o qual difere grandemente dos materiais homogêneos e isotrópicos, tais como metais, plásticos e cerâmicas, cujas propriedades mecânicas são conhecidas e estreitamente controladas pelo processo de fabricação, onde a técnica NDT é usada apenas para detectar a presença de descontinuidades, vazios ou restrições, foi iniciada por Jayne (1959) (apud ROSS e PELLERIN 1994). Ele propôs que a energia armazenada e as propriedades de dissipação do material madeira, poderiam ser medidas não destrutivamente, utilizando técnicas NDT, os quais são controlados pelo mesmo mecanismo que determina o comportamento estático de tais materiais. Em consequência, relações matemáticas convenientes entre essas propriedades, as estáticas elásticas e o comportamento de resistência poderia ser obtido através da análise de regressão estatística.

Os métodos da análise de regressão estatística são utilizados para estabelecer relações matemáticas entre parâmetros NDT e representação das características. Como mostrado na tabela 02, são sumarizados os dados da maioria das pesquisas publicadas sobre a qualidade dos parâmetros NDT em termos do coeficiente de correlação (r). O coeficiente de correlação fica na faixa de -1 a 1. Um coeficiente de correlação próximo de 0,7, indica um relacionamento

positivo. O coeficiente de correlação zero revela que não existe relacionamento positivo ou negativo, ROSS e PELLERIN (1994).

Tabela 02 Resumo das pesquisas sobre correlação entre o módulo de elasticidade e resistência à flexão em tábuas de coníferas, testadas na face maior.

Referência	Espécie	Teor de umidade nominal (%)	Classe*	Largura nominal (polegada)	Local de crescimento	Coef. de correlação (r)
Hoyle, (1961b)	douglas-fir	12	SS,C,U	4,6,10	Orègon, Washington	0,79
					Idaho, Washington	0,72
	western hemlock	12	SS,C,U	4,6,10	Oregon, Washington	0,74
	western larch	12	SS,C,U	4,6,8	Idaho, Washington	0,70
Hoyle, (1962)	grand-fir	12	C,S,U	8	Idaho	0,72
Hofstrand e Howe (1963)	grand-fir	12	C,S	4,6,8	Idaho	0,75
Pellerin (1963b)	douglas-fir	12	combinação de classes visuais	4,8	Idaho	0,76
Hoyle (1964)	southern pine	12	1D,1,2D,2,3	4,6,8	Estados Unidos	0,76
Kramer (1964)	southern pine	12	1D,2,3	4,6,10	Estados Unidos	0,88
Johnson (1965)	douglas-fir	10	SS,C,U	6	Oregon, Washington	0,85
	western hemlock	10	SS,C,U	6	Oregon, Washington	0,86

* As denominações das classes são por regras regionais, em uso na época da pesquisa. Western Products Association e West Coast Lumber Inspection Bureau Grades: SS= seleção estrutural, C= construção, S= norma, U= utilidade e D=densidade.

Fonte: ROSS e PELLERIN, 1994.

2.5.2.3 A CLASSIFICAÇÃO ATRAVÉS DA PROVA DE CARGA

Segundo KLOOT e LEICESTER (1977), a prova de carga é definida como um sistema, onde a classe de tensão de uma peça de madeira é determinada pela capacidade da peça em suportar, sem quebrar ou sem qualquer outro dano, uma tensão igual a mínima estabelecida como tensão básica de serviço, para uma determinada classe. No uso da prova de carga, para determinar a classe de tensão, o critério para a aceitação de cada peça de madeira em extensão limitada é que ela demonstre a capacidade para suportar uma carga de prova específica. Com-

parando outros métodos comumente utilizados para classificação da tensão, baseada na correlação entre a resistência e algumas outras propriedades da madeira, neste método de classificação, como a resistência à flexão é determinada diretamente, não existe dependência de qualquer correlação com outros fatores, tal como é necessário para outros sistemas de classificação.

Com a finalidade de verificar a viabilidade do processo de classificação, através da prova de carga, na seleção da madeira para as camadas tracionadas das vigas laminadas, STRICKLER e PELLERIN (1970 e 1971), em estudos experimentais, concluíram que o método constituía em um melhor controle da qualidade, apresentando um potencial para o uso mais eficiente da madeira em peças estruturais. Concluíram também, que para a camada tracionada sob altas tensões, a madeira deveria ser testada em provas de carga à tração e não na flexão, consistindo num método prático de assegurar resistência confiável nas vigas laminadas, e que, a prova de carga à tração proporcionava ainda, uma avaliação igualmente segura para as emendas e para a madeira em si, permitindo sobretudo, na indicação de aumento da tensão de serviço das vigas laminadas.

Em um programa de pesquisa conduzido pela Universidade do Estado de Washington (WSU), com o objetivo de desenvolver um método aperfeiçoado de seleção da madeira para posicionamento em vigas laminadas, STRICKLER e PELLERIN (1976), desenvolveram procedimentos para a classificação através da prova de carga, para a camada crítica tracionada, em suplemento à classificação pelo módulo de elasticidade (E) do material. No estudo experimental, utilizando os procedimentos de classificação, concluíram que a tensão de projeto admissível de vigas de baixa resistência poderiam ser potencialmente melhorados e que, a quantidade de material danificado por ruptura nos testes, era o mínimo, representando apenas 1% de todo o material testado.

FOX (1978), realizou um estudo experimental em vigas laminadas construídas pelas especificações canadenses, utilizando a disposição por rigidez, da madeira totalmente classificada pelo método visual e pelo módulo de elasticidade e através da prova de carga, para as camadas

externas tracionadas que apresentavam emendas. Os resultados dos ensaios à flexão das vigas, foram comparados a um outro estudo realizado por Johnson em 1971, com a diferença de que naquele trabalho, não apresentava emendas na região altamente tensionada, das camadas externas tracionadas. Foram observados que, a variabilidade nos resultados foi reduzida, pela adoção de critérios mais severos de classificação, das camadas externas tracionadas e comprimidas, as quais foram balanceadas na resistência, em algumas amostras que demonstraram estar comprometidas nessas camadas, antes da ocorrência do colapso por ruptura à tração. Tais observações confirmaram conclusões anteriores, de que com a madeira distribuída pela rigidez, baixos requisitos visuais podem ser utilizados na região comprimida.

Analisando o problema dos testes para a classificação da madeira, MADSEN, (1978), concluiu que os métodos de obtenção das tensões admissíveis, até então utilizados, eram deficientes em vários aspectos. Novos métodos alternativos foram sugeridos e analisados. Segundo o autor, a adoção do método da prova de carga, representou uma excelente oportunidade para aumentar a utilização da madeira e refletir sobre as condições básicas exigidas para a classificação em função da resistência e aparência. O método proposto, poderia evitar uma série de fatores de ajustes, utilizados para medição do produto acabado, ser utilizado como instrumento de controle da qualidade e, orientação sobre o nível de resistência e rigidez, conduzindo a um fator de segurança mais consistente e à melhor utilização da madeira.

Foi utilizado por EBY (1981), o método da prova de carga, para assegurar a resistência de todas as emendas, das camadas críticas da região tracionada de vigas, em equilíbrio com a resistência das madeiras, que era o principal objetivo a respeito da qualidade, nas indústrias de madeira laminada colada. Em muitos estudos anteriores, haviam sido demonstrados que as emendas eram um ponto crítico, para garantir que as resistências das vigas iriam alcançar os valores de projeto. O estudo realizado pelo autor, foi conduzido também, para assegurar que seria encontrado um critério decisivo do sistema expressivo de prova de carga para produtos estruturais. Os resultados do estudo indicaram que a prova de carga não apenas avalia as emendas mas também podem testar madeiras de baixa resistência. Uma madeira com módulo de elasticidade mais baixo do que o estabelecido para o conjunto, é desviado pelo classifica-

dor, rejeitando também peças ocasionais com emendas reprovadas. Segundo o autor, o método da prova de carga, é considerado como o melhor instrumento de controle da qualidade disponível, para a indústria de peças laminadas, permitindo a avaliação de todas as emendas nas áreas críticas da peça, o que não é possível por qualquer outro método.

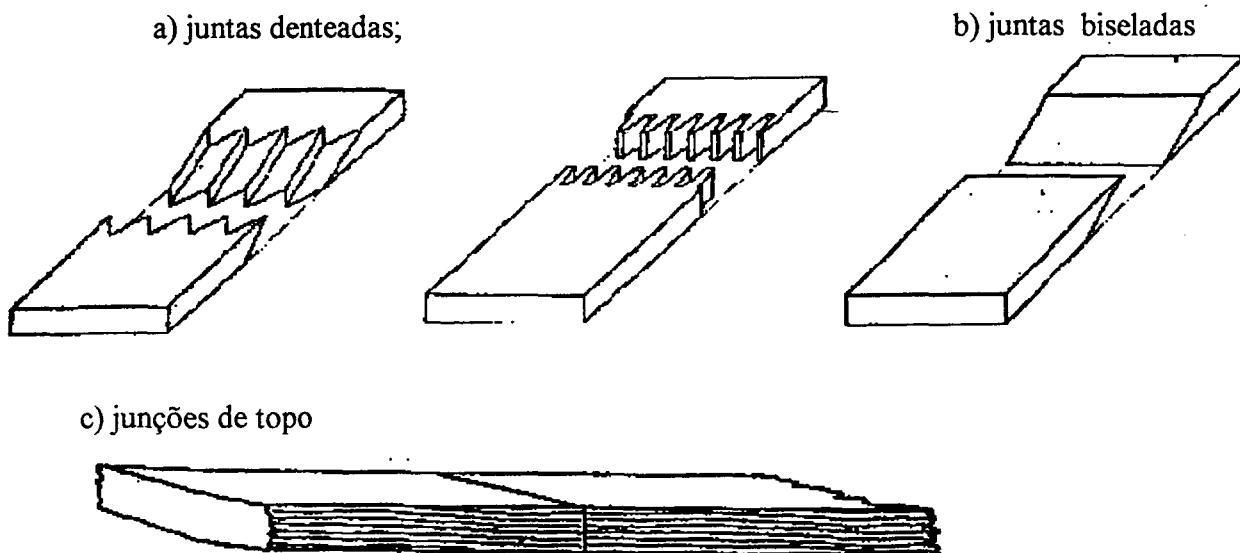
GERHARDS e LINK (1986), realizaram um estudo experimental para verificar o efeito da taxa de carregamento na resistência à flexão em duas classes de qualidade de madeira. Foram ensaiadas amostras de classificação estrutural (SS) e a classe nº 2 de uma espécie de madeira, classificada com base no tamanho e localização dos nós e dos desvios de grã, em três diferentes velocidades de carregamento. O efeito da duração de carga na resistência à flexão da madeira, foi analisado através de um modelo acumulativo de danos. Os resultados demonstraram que a taxa de carregamento afeta a distribuição total da resistência à flexão e que a média da resistência aumenta quase linearmente com o logaritmo da taxa de carregamento. Como consequência, o efeito da duração de carga, aparentemente foi maior para a classe de seleção estrutural do que para a madeira de outra classificação.

2.5.3 AS EMENDAS DA MADEIRA

Na confecção da madeira laminada estrutural, é usual a utilização de tábuas, consideravelmente mais curtas do que o comprimento total da peça acabada. Para alcançar o comprimento necessário, as tábuas individuais passam por uma fase de junção das emendas, durante o processo de fabricação. Existem poucos tipos principais de emendas utilizadas na produção de peças laminadas, embora existam muitas variações dos tipos principais. No processo de fabricação, as emendas de pequenas peças de madeira, são consideradas de maior desperdício e custo na operação de produção, das indústrias de madeira laminada. As emendas mais eficien-

tes, geralmente, utilizam maior quantidade de madeira na sua produção, CHUGG (1964). Foram citados pelo autor, três principais tipos de emendas, mostrados na figura 02:

Figura 02 - Principais tipos de emendas das tábuas.



Fonte: FREAS e SELBO, 1954.

A madeira utilizada estruturalmente, está sujeita a altas tensões e devem desenvolver uma calculável e completa ligação de resistência. A alta resistência das emendas, representam um fator importante na construção de peças laminadas e depende de algumas condições, que podem ser alcançadas, apenas pela técnica eficiente de colagem. Os procedimentos e as precauções necessárias para assegurar a produção de emendas estruturalmente adequadas, são sumarizados pela DIVISION OF FOREST PRODUCTS - CSIRO (1967):

- O teor de umidade dos componentes devem ser corretos e a superfície a ser colada deve estar adequadamente preparada;
- Um adesivo apropriado, preparado corretamente deve ser utilizado;
- O contato total da área de toda a superfície a ser colada;
- As superfícies devem ser ajustadas pela firme pressão, enquanto o adesivo apresentar fluidez;

- A linha de cola deve ser contínua e muito fina. (Isto depende propriamente da preparação da superfície, correta aplicação do adesivo e da pressão adequada).

- A pressão deve ser mantida até a cola estar suficientemente fixada para reter a emenda, assegurando não existir danos, se removido o sistema prensagem;

- As emendas devem ser inspecionadas, através de indicações óbvias de colagem deficiente e se possível, devem ser realizados testes.

Em geral, as emendas devem ter o posicionamento convenientemente determinado, por representar uma descontinuidade na peça laminada e portanto regiões de maior fragilidade em potencial. É importante enfatizar ainda que as emendas de topo não são recomendadas para uso em peças estruturais importantes.

De acordo com CHUGG (1964), a facilidade com que a madeira é colada, comparada a um material não poroso, tem sido freqüentemente atribuída à sua estrutura celular, permitindo ao adesivo penetrar na cavidade das células e formar a base da solidarização. A explicação para uma melhor colagem da superfície da madeira não é necessariamente relacionada à espessura de penetração do adesivo nas células da madeira. Na realidade, a boa penetração da cola ou a fragilidade das emendas, devido a adesão insuficiente, pode estar na qualidade das interfaces a serem coladas.

FREAS e SELBO, (1954), estudaram a variação nos esforços longitudinais dentro das vigas com emendas das tábuas. Foram verificados os esforços em vigas típicas, com todas as formas de carregamento, abaixo do limite proporcional. Em todos os testes, a variação dos esforços na seção transversal foi essencialmente linear, exceto nas proximidades imediatas das emendas. O ponto zero dos esforços foram no ponto médio da espessura das vigas, ou muito próximos desse ponto. Indicando o fato de que sob carregamentos em serviço, a deflexão das vigas e em geral, a distribuição das tensões são determinadas pelas propriedades da seção

transversal total, com as emendas agindo como uma transformadora da tensão, causando uma variação local na tensão.

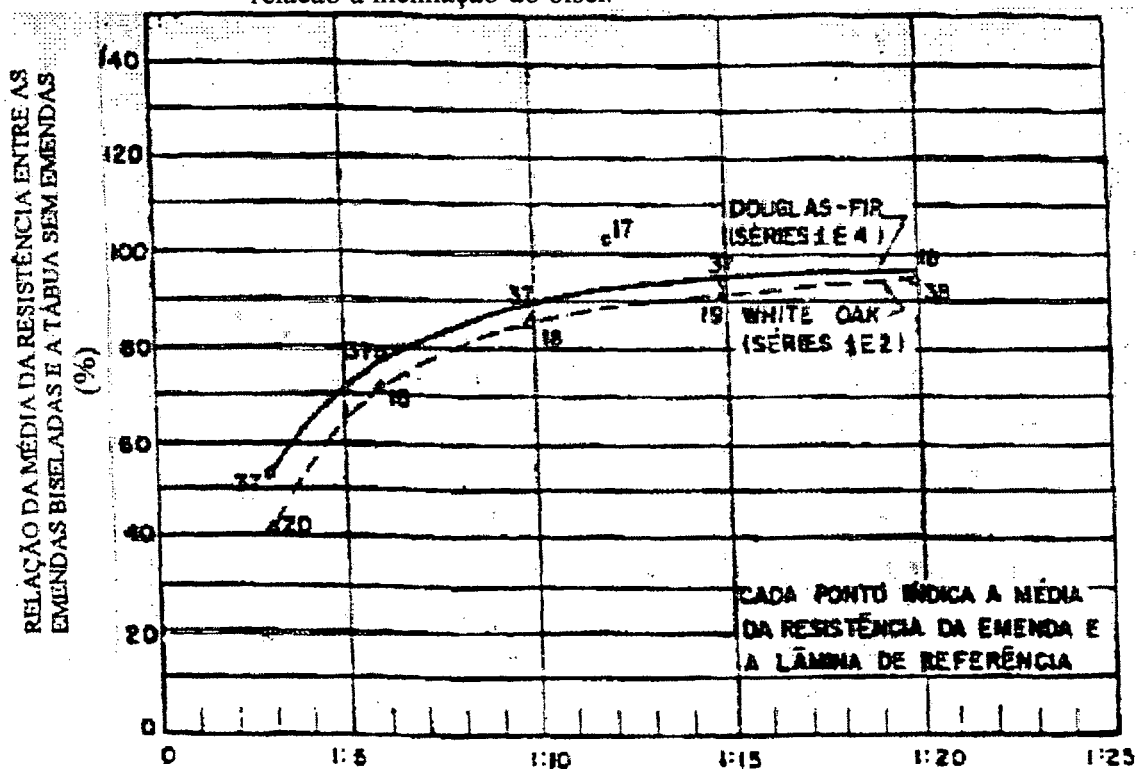
Luxford e Krone (1946) (apud MANTILLA, 1989), realizaram um dos primeiros estudos, analisando vários tipos de emendas, principalmente as emendas de topo, biselada e em forma de cunha. Foi concluído que para a emenda biselada, a eficiência variava em função da inclinação do bisel, obtendo-se aproximadamente 95% de eficiência para a inclinação de 1:20, 85% para a inclinação de 1:10 e 70% para a inclinação de 1:5.

FREAS e SELBO (1954), analisaram experimentalmente alguns tipos principais de emendas, como as de topo e as biseladas. Os testes demonstraram que as emendas de topo quando localizadas na parte comprimida das vigas não influenciavam na resistência das vigas, porém, na parte tracionada, principalmente das camadas externas, a resistência era reduzida em pelo menos 40%. Foi observado posteriormente por Freas (1962) (apud MANTILLA, 1989), que um dos maiores inconvenientes das emendas de topo é a grande concentração de tensões nas camadas adjacentes e, por isso pouco utilizadas em peças estruturais importantes.

A emenda biselada, estudada por muitos autores, aceita como uma boa alternativa para união das peças de madeira, nos resultados dos testes comparativos da resistência, com amostras de peças contínuas, sem emendas, indicaram resistência aproximadamente iguais, sendo demonstrado pelo gráfico da figura 03, o efeito da inclinação dos biseis. Foi concluído que as emendas biseladas são intermediárias entre as ligações paralelas às fibras e as ligações normais às fibras, devendo ser construídas com o mínimo de inclinação em relação às ligações normais às fibras. Sendo constatado também por outros autores, entre eles LEWIS (1951), que esse tipo de emenda, quando produzidas com cuidado e com a inclinação de 1:8 ou mais, tem o comportamento aproximadamente igual ao da madeira sólida.

Segundo FREAS e SELBO (1954), para o espaçamento da emenda biselada em áreas comprimidas de peças flexionadas, não existem limitações entre as camadas adjacentes, contudo é desejável alguma dispersão das emendas. Em peças tracionadas ou seções tracionadas de peças fletidas, onde a tensão de projeto é o valor total admissível, as emendas biseladas nas camadas adjacentes devem ser longitudinalmente espaçadas, do centro ao centro das emendas em pelo menos 24 vezes a espessura da tábuia de cada camada. Para valores mais baixos de tensão, o espaçamento mínimo pode ser decrescido linearmente para zero.

Fig. 03 - Resistência máxima a tração paralela às fibras de emendas biseladas, em relação a inclinação do bisel.



Fonte: FREAS e SELBO, 1954.

BOHANNAN (1966), estudou o comportamento à flexão de grandes vigas laminadas confeccionadas com emendas biseladas, com inclinação de 1:10, apresentando uma resistência que excedia em 80% a resistência da madeira isenta de defeitos quando carregada à tração e

em aproximadamente 100% quando carregada na compressão. No projeto dessas emendas foi suposto que as emendas biseladas não afetariam a resistência das vigas, mesmo que elas fossem localizadas em áreas onde seriam tensionadas em até 75% , da fibra externa máxima tensionada à tração. Nenhuma das rupturas foi verificada através das emendas, em geral ou em áreas localizadas, demonstrando que os procedimentos utilizados de confecção de vigas isentas de características redutoras da resistência visíveis, foram bem sucedidos.

Contudo, em função das dificuldades de fabricação do corte e do alinhamento dos biseis, durante a montagem, ocorriam variações consideráveis resistência da emenda biselada, que foi sendo substituída nas indústrias americanas, pela emenda denteada, Eby (1968) (apud MANTILLA 1989). Em quase todos os estudos publicados até meados da década de 1960, foram utilizadas emendas biseladas para a construção de peças laminadas.

Em uma revisão sobre a utilização estrutural da madeira, realizada por SENFT (1969), foram citados o desenvolvimento dos estudos sobre os vários tipos de emendas e sistemas de ligações. Entre eles Stanger em 1969, (apud SENFT 1971), que investigou alguns fatores que afetam a resistência de emendas denteadas, sendo publicado pelo Forest Products Laboratory que a resistência das emendas carregada na tração paralela às fibras, após 30 milhões de ciclos de uma máquina de ensaios, foi reduzida em aproximadamente 40% da resistência estática, Bohannon e Kavink (1969). Leicester e Bunker (1969) (apud SENFT, 1971), concluíram que influência dos nós e dos furos de pinos e parafusos na resistência das emendas denteadas foram discutidas por outros estudos, sendo concluído que a fragilidade das fraturas mecânicas, a condição a qual a tensão nominal no momento da fratura, em peças geometricamente similares contendo descontinuidade brusca, em função das emendas de topo, depende sobretudo do comprimento das peças envolvidas, na composição das peças laminadas.

BOHANNAN e MOODY (1969), em um estudo para verificar duas classes de madeira das camadas externas tracionadas de grandes vigas laminadas, utilizaram emendas denteadas de produção comercial, com testes de qualificação dentro das especificações da AITC. Embora, as emendas estivessem posicionadas em áreas onde não estariam submetidas a altas tensões, os resultados dos testes à flexão indicaram que as rupturas de um número significativo de vigas

construídas com madeira de “Douglas-fir” e “Pinus do sul” envolviam emendas denteadas e por isso, nas conclusões foram recomendadas que a resistência e a qualidade das emendas denteadas deveriam ser avaliadas posteriormente.

Em um curto período de tempo, poucos anos, as emendas biseladas foram substituídas quase totalmente pelas emendas denteadas nas indústrias de peças laminadas. Pois, a utilização da emenda denteada representa economia de material e de mão de obra. Na produção das emendas, o comprimento necessário de madeira para a emenda denteada é bem menor do que para a biselada e a economia de mão de obra é realizada em função desse tipo de emenda ser mais adaptável à produção industrial, MOODY, (1970).

Segundo o mesmo autor, dados limitados de resistência de emendas denteadas em madeira estrutural foram apresentados por Zehrt (1962) e alguns dados obtidos durante o estudo experimental da prova de carga em madeira com emenda denteada foram apresentados por Strickler, Pellerin e Talbott (1970). Tem sido realizados testes de tração em pequenas amostras de emendas denteadas, isentas de defeitos, contudo não são conhecidos dados de resistência à tração ou à flexão de peças de madeira com várias emendas.

Com o objetivo de avaliar a resistência à tração paralela às fibras das emendas denteadas de madeiras estruturais, confeccionadas sem a presença de material de baixa densidade, obtidos próximo à medula e, também, contendo material associado à medula, portanto de baixa densidade, foram incluídos no estudo de MOODY, (1970), para verificar a eficiência das emendas e obter, uma indicação da resistência à tração encontrados na madeira da classe definida para as camadas tracionadas. Os resultados dos testes indicaram que as emendas denteadas são extremamente afetadas pelo material de baixa densidade, com a média da resistência à tração em 22% menor do que as emendas construídas sem associação desse material e que uma peça de madeira consistindo de duas emendas, sendo uma constituída com material de baixa densidade e de outra sem a presença desse material, apresenta a média de resistência à tração de uma peça totalmente composta com emendas com material de baixa densidade. A resistência à tração das peças com emendas denteadas foi bem menor que as peças de madeira sem emendas.

Como parte dos estudos para a reavaliação dos critérios de projeto de vigas laminadas, particularmente aplicadas à grandes peças, MOODY e BOHANNAN, (1971), ensaiaram cinco grandes vigas de madeira laminada de “Southern pine”, com emendas denteadas posicionadas na metade do comprimento das camadas tracionadas. Os resultados das propriedades de flexão, foram comparados com resultados anteriores, de vigas sem emenda na região central, indicando que as vigas com emendas naquela região crítica, apresentavam a mesma resistência e rigidez. E que, portanto, poderiam ser produzidas emendas denteadas com grau de qualidade e resistência aceitáveis para as camadas tracionadas, seguindo procedimentos de controle adequado da qualidade da madeira na área de emendas. A maioria das rupturas ocorridas foram atribuídas, mais às características redutoras de resistência do que às emendas denteadas.

Considerado como um método preciso e com destaque em potencial para avaliar a resistência de emendas, a prova de carga foi utilizada por STRICKLER e PELLERIN (1971 e 1976), para controle de qualidade de emendas em peças altamente tensionadas à tração e para aumentar a tensão admissível de projeto em tais peças. A seção crítica da camada tracionada de 18 vigas, com emendas denteadas na área de tensão máxima, foram submetidas à prova de carga à tração. A metade das vigas foi construída com as emendas numa sequência alternada, em relação às camadas adjacentes e a outra metade, com as emendas em uma só sequência, nas quatro camadas externas tracionadas. O módulo de ruptura de todas as vigas excederam os valores teoricamente calculados para a prova de carga. A resistência das vigas com as emendas verticalmente alternadas foram significativamente maiores do que as vigas com sequência contínua. As conclusões indicaram ainda que, os valores de tensão admissível de projeto de todas as vigas, com emendas na sequência alternada poderiam ser substancialmente aumentados.

Na pesquisa conduzida para a publicação das especificações da AITC, de orientações sobre o uso mais eficiente da madeira para vigas laminadas, JOHNSON (1973), projetou e construiu 54 vigas para diferentes níveis de resistência e de rigidez. Todas as emendas foram do tipo denteadas. As emendas do lado externo de todas as vigas, foram localizadas em área altamente tensionada, de momento máximo, entre os dois pontos de aplicação da carga, porém

não muito afastados destes pontos. A localização das emendas nas áreas remanescentes de cada viga, foram feitas de acordo com as especificações de normas comerciais americanas (CS253-63). A ruptura de algumas vigas, no ensaio de flexão estática, ocorreram nas emendas da camada tracionada, contudo, todas as vigas excederam o nível da tensão de projeto, designadas para a classe.

Segundo JOKERST (1981), a emenda de duas peças de madeira tem se tornado muitas vezes um complicado desafio. A madeira apresenta sua maior resistência no sentido paralelo às fibras, e o desenvolvimento de emendas que possam transmitir uma proporção significativa dessa resistência, tem sido o objetivo de muitos programas de pesquisas. Historicamente, os métodos aproximados, tem sido em modificar as extremidades das peças a serem coladas, de modo que as emendas adesivas estejam posicionadas ao lado das fibras e, ao mesmo tempo, que a área a ser colada seja suficientemente acrescida, de forma que uma emenda resista ao cisalhamento a uma carga próxima ao que ela possa resistir na tração. Muitos tipos de emendas tem sido projetados, experimentados e descartados, Luxford e Krone (1946) (apud JOKERST, 1981). Algumas formas de emendas foram difíceis de confeccionar, de colar ou, mais frequentemente demonstraram eficiência. Por muitos anos, o padrão de comparação que, em alguns casos ainda permanece, foi a emenda biselada plana. Trabalhos consideráveis foram feitos com este tipo de emenda. As emendas com inclinações de 1:10 ou 1:12 foram estabelecidos para alcançar resistência à tração de 85 a 90% da resistência da madeira isenta de defeitos. Para a inclinação de 1:20 a média foi aproximadamente 95% da resistência à tração da madeira isenta de defeitos, Richards e Goodrick (1959) e Jessome, (1965) (apud JOKERST (1981).

As emendas biseladas apresentaram problemas, primeiro pelo desperdício de madeira, segundo pela precisão com que a emenda é confeccionada, alinhada e colada, as duas superfícies são também críticas na determinação de como as emendas irão se comportar. Sob condições da linha de produção, manter necessária precisão para formar emendas biseladas consistentes, tem comprovado serem difíceis e portanto apresentando performances um tanto variáveis, Eby (1968) (apud JOKERST 1981).

As emendas denteadas não são um novo tipo de emendas, tem sido utilizadas por muitos anos. Em 1955, Norman (apud JOKERST 1981), estudou emendas denteadas de pequenos cortes, ou recortes para uso em móveis e batentes de portas e janelas, citando que em 1947, uma indústria utilizou adesivo de melamina e alta frequência, para substituir a prensagem a frio com o adesivo resorcinol.

A primeira referência sobre a emenda denteada utilizada em aplicação estrutural, foi citada por Egner, Karl e Jagfeld em 1966 do Instituto Otto Graf, em Stuttgart, na Alemanha, (apud JOKERST 1981). No estudo foram discutidos resultados de testes em emendas denteadas de peças de uma ponte construída no começo da década de 1940, após dez anos de utilização.

De acordo com estudos realizados por Foreman, (1973) (apud JOKERST 1981), emendas em madeiras estruturais com espessura nominal de duas polegadas ou menos (± 5 cm) e acima de 12 polegadas ($\pm 30,5$ cm) de largura, são admitidas para a utilização permutável com madeiras sem emendas, aprovadas pela International Conference of Building Officials, sob recomendações do Research Reporter 1837, pela Building Officials Conference of America, sob pesquisa e aprovação do Committee Report 339, pelo Southern Standards Building Code (1973) e pelo Federal Housing Administration sob o boletim "Use of Materials Bulletin Um-51a". Essa admissão, está sujeita ao material ter sido confeccionado sob um programa de certificação de emendas em madeiras estruturais, controle de qualidade e demonstrar estar de acordo com a classe marcada, contendo a indicação de reconhecida associação de classificação ou inspeção de um departamento. A certificação e o programa de controle de qualidade dessas organizações são compatíveis com normas delineadas pelo Department of Commerce Product Standard PS 56-73 for Structural Glued Laminated Timber.

PASSIALIS, (1986), propôs em seu estudo um novo método para a determinação da resistência ao cisalhamento na linha de cola, em madeira laminada. Foi sugerido pelo autor a alteração da forma do corpo de prova, comumente utilizado pelas especificações da ASTM 905-49. Foram comparados os resultados entre as amostras cilíndricas sugeridas e as amostras ortogonais da norma ASTM D905. Pelas conclusões apresentadas, foi demonstrado que o

método proposto poderia substituir com maior precisão e simplicidade de utilização, no controle de qualidade das emendas em peças laminadas.

VAN RENSBURG, BURDZIK, EBERSÖHN e CILLIÉ (1987), estudaram o efeito da densidade e do tipo de adesivo na resistência de emendas denteadas. Foram comparadas as resistências de emendas confeccionadas com adesivo fenol-resorcinol-formaldeído e com duas misturas diferentes de resinas epoxy. Através de resultados de testes preliminares, de carga de longa duração, foi concluído que as emendas com adesivo epoxy demonstraram ser muito promissoras. E que o aumento na resistência, em função do material de maior densidade, pode ser obtido sem acréscimo nos custos, podendo ser utilizados nas camadas externas das vigas. Em um outro estudo realizado pelos autores, foi sugerida uma distribuição das emendas denteadas na viga, para a dispersão dos efeitos redutores de resistência, causados pelas emendas.

No estudo desenvolvido por HERNANDEZ e MOODY (1992) em vigas laminadas de madeira de Pinus do sul, combinadas para alcançar alta resistência e rigidez, foram avaliadas as emendas denteadas, coladas com o adesivo melamina-urea e curadas em um túnel de radio-frequência à temperatura de 200 °F (\cong 93 °C). As emendas foram confeccionadas seguindo as especificações encontradas na ANSI A190.1 (ANSI, 1983) e ensaiadas à flexão estática pelo método não destrutivo e posteriormente na ruptura à tração. Embora a performance real das vigas tenham sido menores que os níveis de resistência previstos e a maioria das rupturas tenham sido atribuídas às emendas, foram presumidos que as resistências das vigas não são controladas apenas pelas emendas e que também foram inadequadas para os níveis de resistência previstos.

2.5.4 ADESIVOS

Os adesivos utilizados em produtos de madeira laminada devem proporcionar resistência de colagem e durabilidade que possibilitem às peças coladas, atuarem como unidade estrutural, por todo o tempo de vida útil em serviço. A vida em serviço da madeira é usualmente determi-

nada pela sua resistência ao apodrecimento e outras causas de deterioração. A ligação adesiva de um produto laminado deve ter a mesma resistência à deterioração, prevista para o tempo de vida em serviço da madeira. Por outro lado, os adesivos utilizados para a colagem, não devem causar danos ou diminuir a resistência da madeira e, devem ainda, permitir as operações de produção, sem dificultar ou causar danos aos equipamentos de aplainamento, FREAS e SELBO (1954).

De acordo com os mesmos autores, antes do desenvolvimento das resinas sintéticas, empregava-se para trabalhos de madeira, tipos de adesivos de origem animal, amidos vegetais, caseínas ou proteínas vegetais. Com a disponibilidade de uso das resinas sintéticas, resultaram no aperfeiçoamento e adaptação de muitos produtos de madeira colada a novos usos, como o compensado para uso externo, madeira laminada para construção de pontes, peças para embarcações marítimas e vários outros produtos de utilização sob condições severas de serviço.

As resinas sintéticas mais comumente utilizadas, foram os adesivos de uréia-formaldeído e de fenol-formaldeído. O uso da resina resorcinol e da combinação fenol-resorcinol tem sido particularmente os mais empregados na produção de peças de madeira laminada. Os adesivos de resina emulsificada vinil-éster, também tem sido utilizados, porém, com algumas restrições, para trabalhos em madeira com acabamentos especializados. Um grande número de adesivos de resinas sintéticas tem sido desenvolvidos, também, para a colagem da madeira e dos produtos de madeira com outros materiais, como o metal e o plástico.

Em um estudo sobre a avaliação do comportamento de peças de madeira laminada coladas com o adesivo fenol-resorcinol, SELBO, KNAUSS e WORTH (1965), concluíram que após duas décadas sob condições severas de serviço, tais como pontes e trilhos de ferrovias, construídos aproximadamente um ano e meio após o adesivo fenol-resorcinol ter sido apresentado para utilização experimental, demonstraram boa performance. Os resultados dos testes em amostras procedentes de emendas coladas, após 20 anos de exposição à intempérie, confirmaram a perfeita durabilidade.

Segundo Dosker e Knauss (1944) (apud SELBO, KNAUSS e WORTH, 1965) as técnicas e procedimentos desenvolvidos para a madeira laminada, foram tão bem sucedidas que, para as peças produzidas comercialmente durante os primeiros anos, a maioria para uso marítimo, não houve notícia de rompimento de uma única emenda colada, em mais de um milhão de pés cúbicos de material laminado.

A escolha e a classificação do adesivo para utilização em construções de madeira, segundo recomendações do “Timber Designer’s Manual” apud ZANDER (1979), é feita pelo tipo de exposição da peça construída, em cinco categorias:

1. Intempérie exterior - alto risco: Nesta categoria são classificadas as estruturas marítimas e de uso exterior em geral, onde o adesivo fica exposto a intempéries. São recomendados o uso de adesivos de resorcina formaldeído e fenol-formaldeído, por apresentarem fatores de resistência e qualidade para as condições exigidas.

2. Intempérie exterior - baixo risco: São classificadas nesta categoria, vigas de galpões e estruturas abertas. São recomendados o uso de adesivos à base de resorcina, fenol ou melamina e urea-formaldeído.

3. Intempérie Interior - de alto risco: São classificadas nesta categoria, estruturas internas onde a umidade pode ultrapassar de 18% na madeira e a temperatura pode exceder a 50 °C, como no caso de estruturas de telhados e de lavanderias. São recomendados os mesmos adesivos utilizados na categoria anterior.

4. Intempérie interior - baixo risco: Nesta categoria, estão as estruturas que não ultrapassam a umidade e a temperatura da categoria anterior, como no caso de interior de casas e edifícios. Podendo ser utilizado qualquer dos adesivos à base de resorcina-fenol, melamina, uréia-formaldeído ou caseína.

5. Especial : Nesta categoria, estão as indústrias químicas, fábricas de baterias e estruturas para piscinas internas. São recomendados para esta categoria, os mesmos adesivos indicados para a utilização na categoria 1.

De acordo com JOKERST (1981), um adesivo não apenas tecnicamente apropriado para a colagem da madeira, pode ser empregado para a montagem de peças laminadas. Porém, a

escolha do adesivo pode ser limitada por alguns fatores, os quais devem ser considerados, tais como a intenção de uso final do produto, as propriedades mecânicas e físicas da ligação, a rapidez com que a ligação deve ser formada, o método de cura, o custo e algumas vezes ainda, a coloração do adesivo. Nem sempre todas estas situações são consideradas, porém, ocorrem fatores predominantes que determinam a automática escolha do adesivo.

Segundo o mesmo autor, quando são conhecidos o tipo de exposição, a que será submetido o produto ou, o tipo de utilização estrutural, a escolha do adesivo se limita praticamente a três tipos de adesivos. Para peças estruturais usadas em exposição ao ambiente externo, devem ser empregados apenas o adesivo à base de resina resorcinol, fenol-resorcinol ou melamina. As resinas à base de uréia e de polyvinyl, são excluídas da utilização estrutural, pois, a resina uréia se deteriora quando exposta ao calor e à umidade e a resina polyvinyl, deve ser excluída em função de seu comportamento plástico permitir deslocamentos, quando mantido sob carregamentos. Se a cura do adesivo for realizada com radio-frequência, as colas fenólicas e alguns epoxies devem ser excluídos, por não serem compatíveis com este método de cura. Os adesivos termoplásticos de polyvinyl (PVA's) e a melamina-urea, devem ser utilizadas apenas em aplicações não estruturais.

Todos os adesivos mencionados pelo autor, são adesivos polímeros de resinas sintéticas e foram basicamente divididas em duas categorias: adesivos termoplásticos e termo-estáveis.

- As resinas termoplásticas, não apresentam solidificação permanente, podem amolecer ou dissolver com o aumento da temperatura e retornam ao estado rígido, quando ocorre o resfriamento. Este processo de solidificação reversível, é considerado envolvendo processos de reações químicas.

- As resinas termo-estáveis, sofrem reações químicas irreversíveis, tanto em temperatura ambiente como em temperaturas elevadas, desenvolvendo resistência e durabilidade. Após a ocorrência da reação, desta categoria de resinas, não podem ser novamente dissolvidas sem serem degradadas.

Os adesivos de resorcinol, fenol-resorcinol e melamina, não são afetados pelos tratamentos preservativos comumente utilizados para a madeira. Porém, podem dificultar a colagem se a madeira for tratada com creosoto ou pentaclorofenol em óleo pesado.

Resinas Resorcinólicas: Os adesivos baseados em resinas resorcinol-formaldeído, começaram a ser utilizadas em 1943. Esta resina tem muitas semelhanças com a resina fenol. A principal diferença é a grande reatividade do resorcinol o qual permite a cura em temperaturas inferiores. Selbo (1975) (apud JOKERST, 1981), o resorcinol é fornecido em dois componentes, a resina líquida e escura com um endurecedor na forma de pó e, algumas vezes também na forma líquida. Este tipo de adesivo, pode ser curado em temperaturas até 21 °C ou acima para a madeira de coníferas e para as madeiras de folhosas, mais densas, geralmente requerem temperaturas maiores. A resina resorcinólica simples, tem o tempo de vida de armazenamento de pelo menos um ano, à temperatura de 21 °C e, seu tempo de vida útil em serviço é usualmente de 2 a 4 horas, na mesma temperatura. O período de montagem é considerado longo e não muito crítico para coníferas. Em madeiras de folhosas de maior densidade o período de montagem deve ser ajustado, normalmente aumentado, para dar maior viscosidade ao adesivo e conseqüentemente apresentar menor fluidez quando da aplicação da pressão.

Resinas fenol-resorcinol: São modificações do adesivo de resina resorcinol puro, produzidos pela polimerização de duas resinas: fenol-formaldeído e resorcinol-formaldeído. A principal vantagem da resina co-polimérica sobre a resina resorcinólica pura é o seu custo significativamente mais baixo, o qual aparentemente pode ser alcançado, sem perda significativa na performance das emendas. As formulações utilizadas, geralmente consistem de para-formaldeído e farinha de cascas de noqueira, misturados em partes iguais, JOKERST (1981). A resina fenol-resorcinol geralmente tem menor tempo de vida de armazenamento do que a resina resorcinol pura, em temperatura de 21°C, usualmente, menos de um ano. Muitos fabricantes ajustam a reatividade da resina fenol-resorcinol para adequar às condições de temperatura predominantes. O fenol-resorcinol pode ainda ser especialmente formulado, para ser curado pelo sistema de radio-frequência.

Resina Melamina: A resina pura de melamina, da mesma forma que a resina resorcinólica pura, não é muito utilizada em emendas, principalmente devido ao alto custo. Em sua forma não catalisada, a melamina requer temperatura de cura relativamente alta, acima de 70 °C. As melaminas que utilizam endurecedores ou catalisadores, solidificam-se muito mais rapidamente em temperaturas mais baixas. Porém, existem indicações de que a melamina com catalisadores, não apresenta a mesma resistência da melamina não catalisada. As resinas puras de melamina são quase brancas e a maioria desses adesivos é comercializada na forma de pó, para ser utilizada, pela mistura da água e preservativos, com um catalisador separado. Como o grupo de adesivos de melamina geralmente tem o tempo de vida em operação de pelo menos oito horas, à temperatura de 21°C e longa taxa de tolerância para o período de montagem em aberto e fechado, tem sido bastante utilizado para cura em radio-frequência, quando é necessária uma linha de cola durável e incolor.

Resina melamina-uréia: São resinas de um grupo especial de adesivos de cura em alta temperatura, produzidos pela mistura seca das resinas, uréia e melamina ou pela mistura das duas resinas separadas, em soluções líquidas, que devem ser vaporizadas e então secadas. Os fabricantes fornecem a resina em pó, a qual é preparada pela adição da água e do catalisador. Na combinação mais comumente utilizada, são admitidas conterem por peso, em média 40 a 50% de resina melamina e 50 a 60% de resina uréia, em bases sólidas. Em emendas denteadas, para a madeira laminada estrutural, é utilizada a proporção de 60:40, de melamina por uréia. Nestes tipos de utilização, geralmente são realizadas curas por aquecimento em radio-frequência. Estas emendas, produzidas adequadamente, são consideradas apropriadas para uso em serviço de interiores normais, secos, porém, não são recomendados se envolverem longo período de exposição externa ou a alta umidade.

Resina uréia: Os adesivos de resina uréia-formaldeído surgiram no mercado em meados da década de 1930. Pela utilização de diferentes tipos e quantidades de catalisadores, foram formulados para serem curados em temperatura elevada ou em temperatura ambiente. Estes adesivos são compatíveis com vários complementos, permitindo assim variações na qualidade e no custo. Sendo de coloração clara, a resina uréia forma uma linha de cola discreta. Porém, a

exposição ao calor e a ambientes úmidos, conduzem à deterioração e eventuais rupturas das ligações. As resinas de uréia são geralmente comercializadas na forma líquida, como suspensão aquosa, mas também, são fornecidas em forma de pó, com ou sem catalisador incorporado. As uréias em pó são preparadas para uso, através da mistura com água. Em geral, a resina uréia na forma de pó, com catalisador separado, tem maior tempo de vida de armazenamento do que na forma líquida ou mesmo na forma de pó com catalisador incorporado. Formulações especiais tem sido desenvolvidas para uso em cura por radio-frequência.

Emulsões resina polyvinyl: São os adesivos termoplásticos, preparados pela polimerização da emulsão vinil acetato e outros monômeros em água, sob condições controladas. Devido aos diversos tipos de monômeros individuais, são referidos pelos fabricantes, a este grupo como PVA's. Na forma emulsificada, os PVA's são dispersos em água, com uma certa consistência e com conteúdo não volátil. São comercializados na forma de fluidos branco-leitosos, para uso em temperatura ambiente, sem aditivos ou catalisadores separados. O adesivo é fixado quando a água da emulsão difunde parcialmente na madeira e a resina emulsificada se coagula. Não existem reações químicas de cura aparente, como ocorre nas resinas termo-estáveis. A fixação é comparativamente rápida, em temperatura ambiente e em algumas construções é possível remover a pressão de colagem em meia hora ou menos, JOKERST, (1981).

2.5.5 A INFLUÊNCIA DOS "NÓS"

Durante meados da década de 1940, os procedimentos utilizados na confecção de construções de madeira laminada, desenvolvidos no período da década de 1930 nos Estados Unidos, demonstraram ser necessárias pesquisas adicionais, para melhor definir a resistência relativa de projeto, de tais elementos estruturais. Parte dessas necessidades, foram estimuladas pela demanda durante a II guerra mundial, para construções pesadas de madeira, em função do abastecimento da madeira sólida serrada em peças únicas não serem adequadas, BOHANNAN e MOODY (1973).

De acordo com Wilson e Cottingham (1952) (apud BOHANNAN e MOODY, 1973), no princípio, foi seguida a teoria de que um nó, de determinado tamanho, pode ter diferentes efeitos na resistência à flexão de uma peça de madeira laminada, dependendo da sua localização. Porém, foi dado maior ênfase na resistência, para a combinação do tamanho do nó com sua posição relativa. Foi suposto que este efeito combinado, poderia ser relacionado a propriedades geométricas da seção transversal da viga, referentes ao momento de inércia. Consequentemente, os resultados dos testes das vigas foram relacionadas à proporção do momento de inércia da seção transversal ocupada pelos nós. Ou seja, resistência das vigas foi relacionada a um fator não dimensional, comumente chamado de I_K/I_G , sendo I_K o momento de inércia da área ocupada pelos nós, dentro de um espaço de 6" (15,24 cm) de cada lado da seção transversal crítica e I_G o momento de inércia de toda a seção transversal da viga.

Segundo estudos realizados por BOHANNAN e MOODY (1973), sobre a evolução dos critérios de resistência da madeira laminada, era impossível projetar peças de madeira laminada, sem o conhecimento de sua resistência, da madeira utilizada na sua montagem e do posicionamento e dimensões dos nós. Do ponto de vista da produção, era igualmente impossível a seleção do posicionamento dos nós de determinados tamanhos, localizados na seção crítica da peça. Era necessário um método para estimar a resistência de uma montagem aleatória da madeira já classificada. Contudo, com o envolvimento da montagem aleatória, foi necessária a indicação do uso de um método estatístico, desenvolvido por FREAS e SELBO (1954). Com a obtenção dos dados sobre o tamanho dos nós na classificação comercial da madeira, foram desenvolvidos a distribuição do tamanho dos nós em cada classe de madeira. Com essas distribuições e a utilização de procedimentos estatísticos, os valores do momento de inércia das áreas ocupadas pelos nós, em qualquer comprimento determinado, para qualquer combinação de classes e número de camadas de madeira, poderiam ser calculados para montagem de peças laminadas.

No estudo detalhado sobre o efeito dos nós, realizado por FREAS e SELBO (1954), foram calculados os valores do fator I_K / I_G , através de equações desenvolvidas, em uma ampla série de ensaios em vigas laminadas. Foram relacionadas as resistências, em função da tensão

no limite proporcional e do módulo de ruptura, à proporção do momento de inércia da seção transversal dos nós com a seção transversal das vigas ensaiadas, ou seja, ao fator I_K/I_G . Os valores determinados demonstraram representar uma curva que poderia indicar a porcentagem de redução da resistência, devido à presença dos nós em uma peça submetida à flexão. Concluindo assim, que a posição dos nós em uma viga laminada influenciam no fator I_K/I_G e portanto na resistência à flexão e que, o módulo de elasticidade de uma peça laminada decresce com o aumento da relação I_K/I_G .

Por muitos anos, foram utilizados como base para projeto e construção da madeira laminada, os estudos realizados por FREAS e SELBO (1954), através da incorporação de muitos conceitos para o estabelecimento de tensões, na norma ASTM D 3737, acrescido de significativas modificações em algumas áreas onde novos dados eram disponíveis.

BOHANNAN (1966), realizando um estudo sobre o comportamento à flexão de grandes vigas laminadas, verificou o efeito dos nós baseado no conceito I_K/I_G , onde I_K foi considerado o momento de inércia do centróide do eixo da seção transversal da área dos nós, dentro de seis polegadas (15,24 cm) para qualquer lado da seção e I_G o momento de inércia de toda a seção transversal da viga. Os resultados mostraram que a média do módulo de ruptura dado pelo relacionamento de I_K/I_G , foram aproximadamente 50% maiores do que os valores determinados experimentalmente, indicando a necessidade de um maior conhecimento dos efeitos dos nós na resistência de grandes vigas laminadas.

Estudando a classe de tensão para a madeira laminada estrutural, de algumas espécies de coníferas, CURRY (1967), analisou o efeito da incidência dos nós nas propriedades de resistência, para determinar o nível de resistência correspondente a cada classe. Através da equação desenvolvida para vigas compostas de material contendo ampla variedade de tamanhos e tipos de nós, relacionados ao coeficiente I_K/I_G . Foi concluída a validade da relação e, pelas equações de regressão múltipla calculada e da análise de variância, demonstrando que a influência dos nós é altamente significativa e ainda que, os resultados poderiam ser aplicados para as espécies estudadas, sem incorrer em erros de importância prática.

De acordo com KOLLMANN e COTÉ (1968), os nós reduzem consideravelmente o valor do módulo de ruptura, das vigas de madeira sólida submetida à flexão, principalmente se eles estão localizados na área tracionada, próximo à seção transversal crítica. Siimes (1944) (apud KOLLMANN e COTÉ, 1968), demonstrou que nós grandes, localizados na parte central do vão em vigas submetidas à flexão, caracterizam melhor essa redução no módulo de ruptura do que a soma dos diâmetros dos nós pertencentes a um mesmo grupo. Investigações teóricas sobre o efeito de diferentes tipos de nós na resistência à flexão da madeira sólida foram realizados por Gaber (1937) e Thunell (1942) (apud KOLLMANN e COTÉ, 1968). Os resultados são valores limitados, em função do momento de inércia ser na maioria das vezes reduzido devido a vários nós e visto que o nível de influência do efeito do desvio da grã em torno dos nós, são fatores desconhecidos.

Segundo WOLFE e MOODY (1981), nos Estados Unidos, durante o período de 1950 a 1960, foram coletados dados sobre os métodos de seleção, ou técnica de medição dos nós pela associação de madeireiros e indústrias representativas, os quais mediam a dimensão máxima dos nós da pior face das tábuas e às vezes eram utilizados o método da superfície aleatório. Tais dados não foram publicados e foram utilizados para preparar as primeiras especificações para a madeira laminada. Um estudo sobre a frequência dos nós na classificação de uma espécie para a madeira laminada no Canadá, foi publicada por LITTLEFORD (1963). Os dados dos nós foram coletados para quatro classes de madeira, utilizando a medição através da técnica do deslocamento.

BOHANNAN e MOODY (1969 e 1970), no estudo para avaliar o comportamento de grandes vigas laminadas, construídas com duas classes de madeira na camada tracionada, utilizou o método da pior face para coletar dados sobre os nós. JOHNSON (1969 e 1971), também utilizou o mesmo método, da pior face, para mapear e medir o tamanho dos nós, das quatro camadas externas de maior tensão na madeira, em cada viga, no trabalho realizado sobre grandes vigas laminadas construídas com madeiras testadas não destrutivamente.

Segundo WOLFE e MOODY (1981), em outros estudos realizados por MOODY (1974 e 1977), foram utilizados o método do deslocamento para medir os nós das camadas externas de maior tensão nas vigas e o método da pior face no restante da amostra. MOODY (1976), utilizando o mesmo método de deslocamento, realizou um estudo para determinar os parâmetros de distribuição do tamanho dos nós na classificação da madeira para peças laminadas.

2.5.6 A INFLUÊNCIA DA ALTURA DA SEÇÃO TRANSVERSAL

No projeto de peças estruturais de madeira laminada, são usualmente empregadas as fórmulas aplicadas à peças de madeira sólida pois as emendas, se adequadamente efetuadas, apresentam as mesmas resistências normais ao cisalhamento da própria madeira sólida, utilizada na confecção das peças. Contudo, para a madeira laminada podem ser projetadas peças, que na forma e altura da seção transversal, excedem as dimensões normais aplicadas à seção da madeira serrada sólida, sendo necessários no projeto, a aplicação de fatores especiais de modificação, normalmente requeridos apenas para construção de madeira laminada, CHUGG (1964).

De acordo com MANTILLA (1989), é indicado na literatura que o efeito da altura e da forma da seção transversal em uma viga de madeira sólida é há muito tempo conhecida. Tal comprovação levou ao desenvolvimento de fatores empíricos de altura e forma, os quais são aplicados nas equações usuais de cálculo de flexão. Devido as limitações naturais das dimensões da madeira sólida, o efeito da altura da seção transversal não era considerado de importância, porém para a madeira laminada, são bastante comuns vigas de dimensões consideráveis, portanto tornando-se de maior importância a consideração desse efeito.

Para FREAS e SELBO (1954), vigas ou outras peças excêntricamente carregadas na compressão, desenvolvem nos testes, maior tensão de compressão do que quando as peças são uniformemente comprimidas ou são concêntricamente carregadas. Isto ocorre com vigas de seção circular ou de seção quadrada carregadas na diagonal-vertical, ao invés da orientação

normal, desenvolvendo tensões de flexão maiores que a seção retangular. Por outro lado, as vigas de seção I ou celulares, demonstram valores mais baixos de tensão do que as vigas retangulares. Entre as vigas de seção retangular, a unidade de resistência calculada decresce com o aumento da altura da viga.

Segundo o Forest Products Laboratory (1924) e Markwardt (1938) (apud FREAS e SELBO 1954), todos os dados disponíveis estão de acordo com a hipótese de que os elementos da estrutura da madeira comportam-se como pequenas colunas delgadas submetidas sob esforços de cargas e que em qualquer solicitação de tensão de compressão não uniformemente distribuídas. Como acontece com uma viga ou uma peça excentricamente carregada na compressão, os elementos mais altamente solicitados são impedidos de flambar pelos outros elementos menos solicitados. Isto pode ser expresso como a hipótese de uma ação suportadora, que no caso da seção circular o suporte é aumentado com o acréscimo da largura da seção e da distância das fibras externas. Em vigas de seção transversal altas os valores da ação suportadora são mais baixos, portanto de menor resistência do que as vigas de pequena altura, devido à menor proporção no decréscimo de tensões com a distância dos elementos mais externos, das fibras mais afastadas. A conclusão dessa hipótese é que as tensões em flexão não são propriedades reais da madeira, mas de manifestações do comportamento na compressão sob circunstâncias variadas e que, ainda são modificadas quando apresentam defeitos que reduzem a resistência à tração abaixo da resistência à compressão.

Foi demonstrado por Baumann (1922) (apud KOLLMANN e COTÉ, 1968), que o valor módulo de ruptura de vigas de madeira sólida submetidas à flexão, diminui com o decréscimo da proporção do comprimento do vão (L) e com a altura (h) das vigas. Apenas para valores de $L/h \geq 20$, a resistência à flexão torna-se aproximadamente constante. O efeito do tamanho da seção da viga, no valor do módulo de ruptura é baseado na estrutura heterogênea da madeira.

Bohannon (1966) (apud BOHANNAN, 1969), estabeleceu relações evidenciando a variação da resistência em peças de madeira submetidas à flexão, em função do efeito do tamanho e em particular da altura da seção transversal.

No estudo sobre a influência da forma das vigas de madeira na rigidez e resistência, relacionando o conceito composto pelo módulo de ruptura, resistência à compressão e fator de suporte, foi desenvolvida uma relação empírica, a equação 2.8, a partir de dados obtidos em ensaios de vigas de até 12 polegadas (30,48 cm) de altura, sendo originalmente apresentada pelo Forest Products Laboratory em 1924, a seguinte fórmula:

$$F_h = 1,07 - 0,07 \sqrt{H/2} \quad (\text{equação 2. 8})$$

onde F_h representa a proporção da resistência da viga de altura H .

Posteriormente com novos dados obtidos, o fator altura foi reavaliado sendo apresentada a equação 2.9, deduzida por Dawley e Youngquist e publicado por FREAS e SELBO (1954), tomando como base vigas de 2 x 2 x 30 polegadas, com carga concentrada no meio do vão, para vigas de altura superior a 30 cm:

$$F_n = 0,81 \frac{H^2 + 143}{H^2 + 88} \quad (\text{equação 2. 9})$$

onde F_h = efeito do fator altura

e H = altura da seção em polegadas

WARDLE (1970), realizou vários estudos para estabelecer modificações sobre as tensões admissíveis de projeto em vigas devido ao fator altura, pela variação da altura da seção e pelo fator de dispersão em função da variação do número de camadas de madeira, da norma New Zealand Standard Recommendation for Glued Laminated Timber Construction D 7624. Utilizando a fórmula da equação 2.9, desenvolvida pelo Forest Laboratory, o autor concluiu que as tensões admissíveis de flexão diminuíam com o acréscimo da altura da seção da viga. Por outro lado, o fator do efeito de dispersão dos defeitos aumentava as tensões admissíveis com o acréscimo do número de camadas de madeira, tendendo a anular o efeito do fator altura.

Foram sugeridos a combinação dos dois fatores para seleção de classes e espessuras adequadas para a madeira laminada.

As especificações da norma AITC 117-71, publicados pelo American Institute of Timber Construction (1972), recomendam que quando a altura de uma viga de seção retangular exceder a 12 polegadas (30,48 cm), os valores tabelados de tensão na flexão, devem ser reduzidos através da multiplicação por um fator de ajuste, determinado pela seguinte relação:

$$C_F = (12 / H)^{1/9} \quad (\text{equação 2.10})$$

onde:

C_F = fator tamanho

e H = altura da seção da peça (em polegadas).

A relação do fator tamanho recomendada pela AITC 117-71, pode ser aplicada com razoável precisão, para situações de projeto comumente encontradas, em peças fletidas, que satisfaçam as condições básicas como: a) vigas simplesmente apoiadas, b) cargas uniformemente distribuídas c) relação vão/altura (L / h) de 21. Para outras relações de vão/altura e condições de carregamento, a percentagem de alteração, pode ser diretamente aplicado os valores do fator tamanho, apresentado pela tabela 03:

Tabela 03 Influência do fator tamanho na relação vão / altura das vigas.

RELAÇÃO VÃO / ALTURA (L / h)	PERCENTAGEM DE ALTERAÇÃO
7	+ 6,3%
14	+ 2,3%
21	0
28	- 1,6%
35	- 2,8%

Fonte: AITC 117-71.

KEENAN, (1974), estudando a resistência ao cisalhamento de vigas de madeira observou que esta resistência não era constante, porém que o cisalhamento decrescia com o aumen-

to da relação vão / altura das vigas. Baseando-se nos postulados anteriormente estabelecidos, de que a resistência ao cisalhamento da madeira, era significativamente aumentado devido a aplicação da tensão perpendicular de compressão, nos apoios da viga e que quando a carga é aplicada próximo ao apoio, a máxima tensão de cisalhamento era consideravelmente menor do que a forma usual calculada. No estudo experimental analisando estes dois postulados, foram demonstrados não serem significativos para explicar o comportamento das vigas laminadas coladas. Foi proposto um modelo o qual concilia a resistência ao cisalhamento de toda a madeira, sem considerar a forma como elas foram determinadas, foram demonstrados também, onde os projetos de cisalhamento correntemente praticados, são deficientes e onde são conservativos.

MARX e MOODY (1982), desenvolveram um estudo experimental para avaliar o efeito da largura das tábuas e qualidade da camada tracionada em vigas laminadas compostas de quatro camadas, em testes de flexão estática. Os resultados observados, não indicaram diferenças significativas entre a resistência à flexão das vigas por tamanhos, mas apenas em função da qualidade da madeira das camadas tracionadas.

MOODY e FALK, (1990), com base na análise de resistência à flexão de mais de 500 vigas laminadas de madeira de *Douglas-fir* e de *Southern pine*, desenvolveram o relacionamento do efeito do volume na determinação das tensões de flexão admissíveis de projeto, para grandes vigas. O fator de projeto foi determinado através de um programa de testes concluído pela AITC o qual estabelece dados adicionais para a avaliação da aplicabilidade deste fator de projeto. A versão simplificada do fator efeito do volume utilizada foi a equação aproximada 2.11. Os resultados ajustados pelo fator apropriado, considerou que para as camadas tracionadas, foram indicadas a qualidade necessária para a espécie de Douglas-fir e que os resultados prévios para outras espécies mostraram não ter efeito significativo.

$$C_v = (V_o / V)^{0,102} \quad (\text{equação 2.11})$$

onde:

C_v = fator de ajuste do volume

V_o = volume de uma viga padronizada com as dimensões fixadas em 130 mm x 305 mm x 6,4 m.

V = volume da viga sob consideração, com as mesmas unidades das dimensões utilizadas para V_o .

No cálculo de projetos para peças básicas de seções retangulares ou cilíndricas de madeira sólida ou laminada, baseados nas regras comuns unificadas para estruturas de madeira da Commission of the European Communities-CEC (1988), (EUROCODE No. 5, baseada na ISO Standards), são considerados diversos fatores, em função dos esforços de tração, compressão ou de flexão a que ficam submetidas as peças de madeira. Os efeitos do tamanho do volume são considerados para peças submetidas à tração perpendicular às fibras, e o efeito da distribuição dessas tensões de tração, são expressos através da seguinte condição:

$$\sigma_{t, 90, d} \leq k_{vol} k_{dis} f_{t, 90, d}$$

onde,

σ_t = tensão normal de tração;

90° = ângulo formado entre a força de tração e as fibras;

d = lado medido a cada $6,35 \text{ cm}^2$

$k_{vol} \leq 1$, em função do efeito do tamanho do volume V , sob tensão de tração;

k_{dis} = fator do efeito de distribuição das tensões;

f_t = resistência à tração.

Os fatores k_{vol} e k_{dis} são determinados sob aproximação de dois parâmetros da distribuição de Weibull, da resistência à tração perpendicular às fibras.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 COLETA E PREPARO DO MATERIAL

O material utilizado na parte experimental deste trabalho, foi a madeira de *Pinus taeda* L., adquirida nos fornecedores da região de Curitiba. Segundo informações do fornecedor, a madeira consistia de um único lote, sendo proveniente de povoamento com 21 anos de idade, implantado no município de Almirante Tamandaré - PR. O lote de madeira serrada foi obtida ao acaso.

A coleta da madeira de pinus foi realizada no pátio de uma serraria, no município de Curitiba, no estado do Paraná. O lote amostrado foi composto de aproximadamente 730 tábuas, com dimensões nominais de 15,24 cm x 2,54 cm de seção transversal e comprimento variando entre 200 a 250 cm.

3.2 DESCRIÇÃO DO MATERIAL E CLASSIFICAÇÃO INICIAL

As tábuas foram preparadas por uma indústria de peças laminadas local, PREMONTAL Construções Pré-montadas Ltda. Inicialmente, foi realizada uma classificação visual, observando os procedimentos usuais de produção, adotados durante vários anos pela empresa, tais como eliminação dos defeitos provenientes da secagem (vergamento) e de nós com diâmetro superior a 50 mm em qualquer posição da tábua.

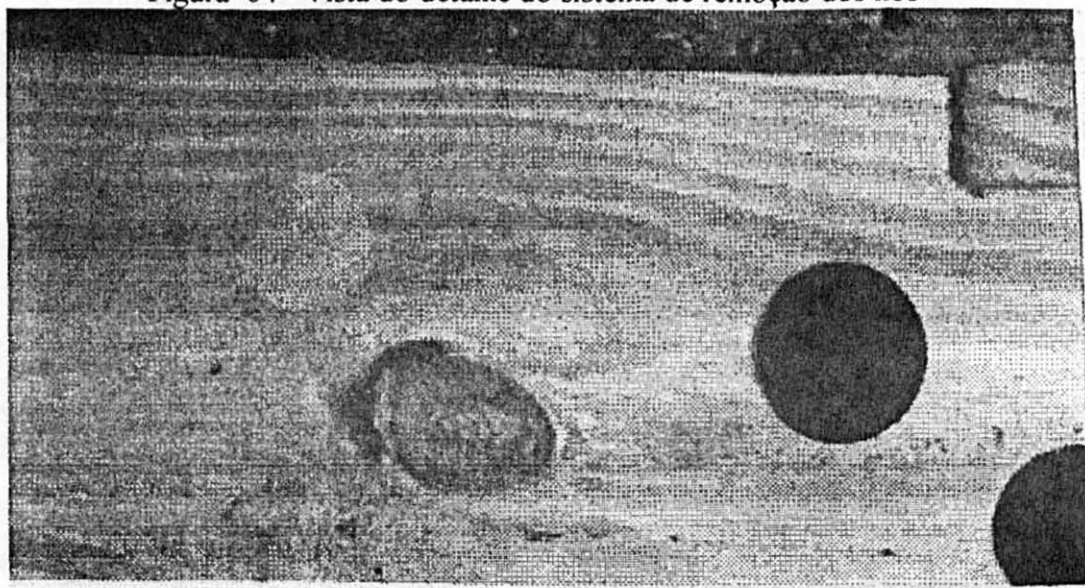
Em função de estar na fase de desenvolvimento, a metodologia pela qual a resistência característica e as propriedades de resistência requeridas por classe são estabelecidas pelo projeto

de norma CEN, para a madeira estrutural e madeira laminada descrita na EN TC 124.203, (1990a) e EN TC 124.207, (1990b) - COMITE EUROPEAN DE NORMALISATION, foram determinados neste estudo apenas os valores do módulo de elasticidade paralelo médio das tábuas individuais e algumas propriedades determinadas em corpos de prova, coletados aleatoriamente, os quais foram utilizados para a caracterização da madeira.

Os valores definidos pela citada norma, podem ser observados na tabela EN TC 124.203 reproduzida no Anexo 4, a qual indica as propriedades de resistência e de rigidez requeridas, para serem admitidas em cada classe de tábuas. A tabela 4 - EN TC 124.207 também transcrita no mesmo Anexo, dá a classificação das vigas produzidas com as classes de madeira requeridas, bem como as resistências características e as propriedades de resistência para as vigas laminadas confeccionadas em camadas homogêneas ou combinadas.

As 730 peças iniciais de madeira, com dimensões nominais de 25,4 mm x 152,4 mm (1"x6") de seção transversal, apresentavam o comprimento variando entre 2,00 m a 2,50 m, com média de aproximadamente 2,20 m. Todas as tábuas selecionadas e classificadas, passaram por um processo de remoção e substituição dos nós e outras partes defeituosas das tábuas por madeira sã, como é mostrado na figura 04. Tal operação conhecida como "patching" foi realizada pela principal razão de proporcionar a formação de uma linha adesiva resistente, pois frequentemente tem sido atribuído aos defeitos, as causas da delaminação da linha adesiva, devido ao diferente índice de penetração do adesivo, do material que constitui o nó. Segundo CHUGG (1964) a delaminação da linha de cola inicia-se na linha adjacente aos nós e desenvolve-se em cada lado do nó ao longo da linha de cola.

Figura 04 Vista do detalhe do sistema de remoção dos nós



3.2.1 ESPESSURA DAS TÁBUAS

A espessura das tábuas adotada para este estudo foi em função de problemas associados à secagem de grandes seções e a maior facilidade na obtenção de madeiras de pequenas espessuras. Algumas especificações como a ASTM D3737, CSA 0122 e CHUGG (1964), determinam uma espessura máxima para as tábuas, em 50 mm. É oportuno observar que na composição de vigas laminadas, utilizando-se de madeiras de grande espessura, o custo de produção torna-se menor, em função da economia do consumo de adesivo, da mão de obra e dos equipamentos utilizados.

3.2.2 TEOR DE UMIDADE DAS TÁBUAS

Segundo alguns autores como FREAS e SELBO (1954) e CHUGG (1964), o grau de umidade adequado para a madeira de peças laminadas deve ser um nível tal que proporcione

uma linha adesiva resistente e que, a umidade da madeira acrescido da umidade proveniente do adesivo, seja a umidade de equilíbrio da peça quando em serviço.

O teor de umidade da madeira utilizada no estudo variou de 5 a 8%. A secagem das tábuas foi realizada em estufa artificial, pela SEMA - Secagem de Madeiras Ltda. utilizando o método convencional, processo controlado com potencial de secagem de 3,0 a 3,5, temperatura máxima de 65 °C e velocidade do ar de 3 m/s.

O nível de umidade da madeira foi estabelecido segundo recomendações de FREAS e SELBO (1954), os quais especificam que no instante da colagem, a madeira para produção de peças laminadas, para uso em serviço interno é de 8 a 10%, e de 12 a 15% para uso externo. Recomenda-se ainda, que não existam diferenças no teor de umidade entre as tábuas de uma peça laminada, em função das tensões que são criadas por essas diferenças prejudicando a sua resistência. Alguns autores admitem diferenças de 5% no teor de umidade entre as tábuas de uma mesma peça; CHUGG (1964) recomenda que essa diferença seja no máximo de 3%.

A uniformidade no teor de umidade entre as tábuas foi observada para que os movimentos causados pelos diferentes coeficientes de contração e de inchamento, devido a sua estrutura anisotrópica, não produzissem tensões na linha adesiva, podendo causar a delaminação. Foram observadas ainda, as recomendações para que fossem evitadas grandes alterações no teor de umidade das peças laminadas, após serem fabricadas.

O teor de umidade definido baseou-se nas considerações de que o nível de umidade das tábuas aumenta quando é aplicado o adesivo, e essa percentagem de aumento depende da espessura das tábuas, do tipo do adesivo, da espécie da madeira e da quantidade de adesivo aplicado, conforme as recomendações citadas por CHUGG (1964), observando-se principalmente o efeito da pequena espessura da madeira utilizada no presente estudo.

3.2.3 ADESIVO UTILIZADO

A escolha do adesivo para a confecção dos modelos de viga laminada foi feita em função da resistência aos esforços, da facilidade de cura em temperatura ambiente e dos resultados apresentados em outros estudos. Foi escolhido o adesivo à base de resina resorcinol, denominado comercialmente por Cascophen RS-216, fabricado pela ALBA S.A. Indústrias Químicas. A resina é sintética, à base de resorcinol-formol, em solução de álcool ou água, recomendada para colagens resistentes à água fria ou fervente. O adesivo é preparado pela mistura do endurecedor FM-60-M, após o que, numa temperatura de 20 °C, tem vida útil de aproximadamente 4 horas.

Para a utilização do adesivo, foram observadas as especificações do fabricante, sobre o tempo de montagem e prensagem que variam em função da temperatura. O tempo de montagem, compreendido entre o espalhamento da cola na superfície até a aplicação da pressão, a fim de possibilitar a penetração do adesivo, e o tempo mínimo de aplicação da pressão recomendados, foram os seguintes:

Temperatura ambiente da madeira e da cola	Tempo máximo de montagem em minutos			
	20 °C	26 °C	32 °C	38 °C
Montagem aberta (superfícies expostas)	15'	10'	7'	5'
Montagem fechada (superfícies juntas)	60'	40'	25'	15'

Temperatura ambiente da madeira e da cola	Tempo mínimo de prensagem em horas			
	20 °C	24 °C	28 °C	32 °C
Tempo sob pressão (horas)	10 a 14	8 a 10	6 a 8	5 a 6

Além das especificações, foram observados os seguintes itens:

- Pressão mínima exercida: 600 kPa
- Quantidade utilizada: 350 a 400 g/m², com aplicação em ambas.
- Tempo de aplicação da pressão: acima de 10 horas
- Tempo requerido após a prensagem: de 8 a 10 dias, mantidos em repouso à temperatura ambiente, média de 20°C, para alcançar o máximo da resistência da linha de cola.

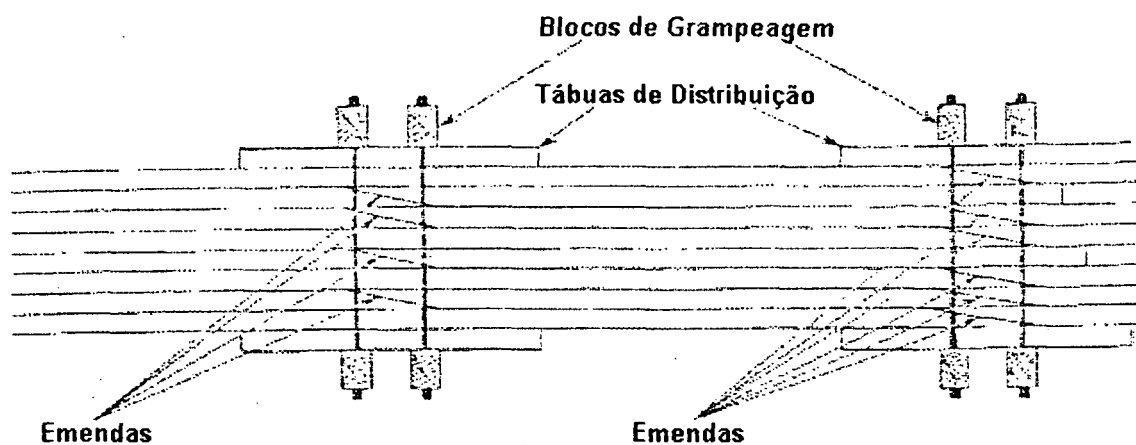
O adesivo foi aplicado nas duas faces da tábua, através de pincéis.

3.2.4 CONFECÇÃO DAS EMENDAS E AJUSTE DO COMPRIMENTO

As peças de madeira foram constituídas por emendas, para alcançar o comprimento desejado em cada camada, sendo preparadas 367 tábuas, com dimensões nominais de 143 mm x 23 mm na seção transversal e comprimento médio de aproximadamente 4,20 m. A união das peças da tábua para compor o comprimento necessário neste estudo, foi realizada através da emenda biselada, com inclinação do bisel de aproximadamente 1:8. Sendo necessário efetuar mais de uma emenda em cada peça, foi observado o espaçamento mínimo entre as emendas de 6 vezes a espessura, recomendado por FREAS e SELBO (1954).

As emendas biseladas foram confeccionadas separadamente das vigas laminadas, com a preparação prévia dos biseis e dos grampos para a aplicação da pressão. Após a aplicação do adesivo nas duas faces dos biseis, as tábuas foram justapostas para a aplicação da pressão necessária, através dos grampos e torquímetro, como pode ser visto pelo esquema da figura 05. Nesta operação foram separadas amostras aleatórias das emendas, para a confecção dos corpos de prova, com o objetivo de avaliar a sua resistência na tração paralela às fibras.

Figura 05 Esquema do sistema de prensagem para as emendas biseladas.



Fonte: CHUGG, 1964

3.2.5 PREPARAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DAS TÁBUAS

Para desenvolver boa resistência na linha de cola, as superfícies da madeira, antes de serem montadas e coladas, foram preparadas mecanicamente de forma que se ajustassem perfeitamente. Essa é uma das operações mais importantes, no processo de confecção de peças de madeira laminada, pois a qualidade do produto final depende da precisão e do cuidado dispensado a essa fase de fabricação.

O aplainamento final, antes da colagem, objetivou também reduzir as tábuas para as espessuras desejadas, removendo o excesso de adesivo e as irregularidades das emendas. As superfícies foram devidamente verificadas e controladas para que não houvesse falhas excessivas, pois existem comprovações de que a rugosidade da superfície (arranhamento) e poeira na superfície, devido ao lixamento, prejudicam a ligação.

3.3 TESTES DO MATERIAL

Através da máquina de classificação mecânica, as tábuas foram classificadas de acordo com os valores do módulo de elasticidade, MOE. Foram selecionadas amostras aleatórias de todo o material classificado, para testes de propriedades do material. Estes testes forneceram as informações complementares para o estabelecimento da classe de madeira dentro das condições requeridas pelas especificações da CEN.

Os testes de propriedades das tábuas foram: (1) flexão estática, (2) resistência à compressão paralela às fibras e (3) densidade média. As amostras foram selecionadas de tal forma que cada grupo de teste pudesse representar o máximo possível as classes de distribuição de rigidez das tábuas.

Os testes foram realizados de acordo com as especificações da norma ASTM D 143-67, com dimensões nominais de 20 mm x 20 mm x 300 mm, para flexão estática e 25 mm x 25 mm x 100 mm para resistência à compressão. Todos os testes foram desenvolvidos ao teor de umidade nominal de 12%, de acordo com recomendações de estudos baseados na norma CEN.

3.3.1 TESTES EM CORPOS DE PROVA LIVRES DE DEFEITOS

- Massa específica das tábuas

A massa específica média das tábuas foi determinada através de 180 amostras coletadas aleatoriamente, utilizando o mesmo corpo de prova para testes de flexão estática e de compressão paralela. A determinação da massa específica foi feita através do método estereométrico, sendo que as medições do peso (P_u) e volume (V_u) foram feitas antes da realização dos testes.

Fórmula utilizada: $MEa = P_u / V_u \text{ (g/cm}^3\text{)}$ (3.01)

- Teor de umidade: a determinação do teor de umidade foi realizada pelo método da pesagem, através da fórmula:

$$U = [(P_u - P_o) / P_o] \times 100 \text{ (\%)} \quad (3.02)$$

onde: P_o = peso seco em estufa à $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

- Flexão estática

Os testes de flexão estática foram realizados em 120 corpos de prova e o módulo de elasticidade foi calculado através da expressão usualmente empregada para o cálculo da flecha:

$$\Delta f = \frac{P' \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

Sendo I o momento de inércia da seção transversal do corpo de prova, expresso por :

$$I_x = I_y = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

considerando a deformação no limite proporcional como flecha máxima, obteve-se a equação:

$$\Delta f = \frac{P' \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot \frac{b \cdot h^3}{12}} \Rightarrow E = \frac{P' \cdot L^3}{4 \cdot \Delta f \cdot b \cdot h^3} \quad (3.03)$$

onde:

E = módulo de elasticidade (N/mm^2);

P' = carga no limite proporcional (N);

L = comprimento do vão (mm);

Δf = deformação correspondente à carga no limite proporcional (mm)

b = largura do corpo de prova (mm);

h = altura do corpo de prova (mm)

Os valores do módulo de ruptura foram determinados através da equação (2.05), descrita no item 2.6.1.2.

- Compressão paralela

Foram realizados testes de compressão paralela em 89 corpos de prova, sendo determinado o módulo de ruptura por compressão, utilizando-se a seguinte fórmula:

$$MOR = P / A. \quad (3.04)$$

onde: P = carga máxima suportada pelo corpo de prova (N)

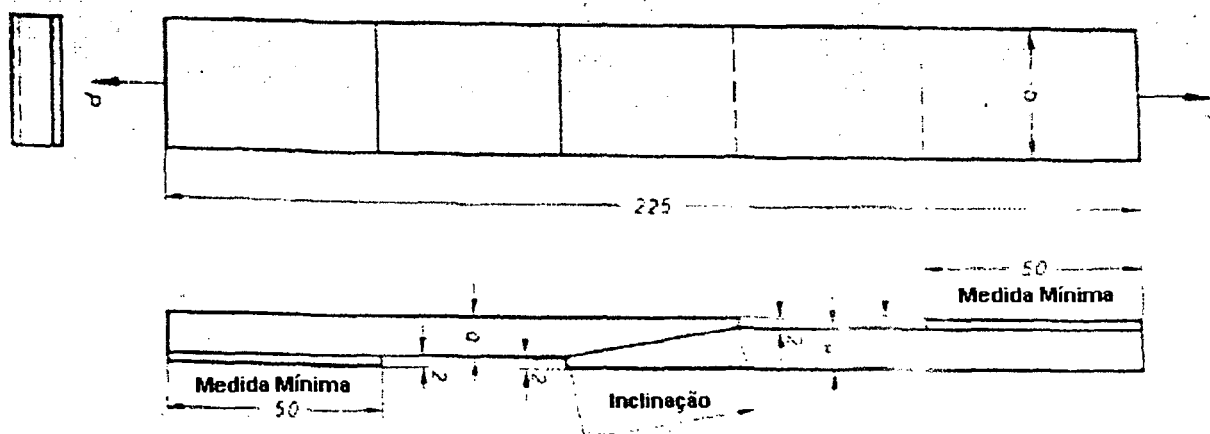
A = área da seção transversal do corpo de prova, determinada antes do ensaio (mm^2).

Os ensaios de caracterização da madeira foram realizados seguindo as especificações do método de ensaio da norma americana ASTM.

- Tração paralela às fibras: emendas biseladas

Os corpos de prova da emenda biselada, foram confeccionados a partir do modelo de tração paralela, baseado na norma alemã DIN 53.253 (1964), conforme é apresentado na figura 06.

Figura 06 Corpo de prova da emenda biselada.



Fonte: norma alemã DIN 53.253, (1964).

3.4 CLASSE DAS TÁBUAS

Um dos meios para otimização do uso do material, consiste em alterar a forma geométrica da seção transversal da viga para compensar a diminuição dos esforços internos, levando a desenhos de elementos estruturais do tipo duplo T, similares aos utilizados em concreto armado. A segunda possibilidade é a combinação de diferentes qualidades de madeira na seção transversal, o que pode ser realizado por uma simples classificação estrutural mecânica.

Para determinar a classe, de todo o lote de tábuas representativas da população de origem, os resultados obtidos na máquina de classificação, de rigidez à flexão, foram analisados. A classificação das tábuas observou os valores especificados na EN TC 124.203. Os testes de flexão realizados na face maior das 367 peças de madeira foram feitos sobre um vão de 900 mm, determinando uma medida do módulo de elasticidade (MOE), definidos em quatro pontos de cada peça. Para cada peça de madeira, foi calculado o módulo de elasticidade médio.

3.4.1 CLASSIFICAÇÃO

Cada tábua composta para formar uma camada de madeira na viga laminada, foi classificada no Laboratório de Tecnologia da Madeira, através de uma máquina pneumática de classificação mecânica (Stress-Grading: MK III - TIMBER GRADER; Polak Engineering; África) com carga controlada manualmente. A máquina foi ajustada para uma carga constante, abaixo do limite de proporcionalidade, determinada separadamente em testes preliminares de flexão, em amostras do material destinadas a ensaios.

A classificação das peças realizou-se mediante o módulo de elasticidade em flexão (MOE). Foram determinadas através do módulo de elasticidade médio ($MOE_{médio}$) de cada tábua, dez classes de tábua, tabela 04, definidas na norma CEN (EN TC 124.203, 1990a), que estabelece as propriedades requeridas do material, aplicáveis a classe de resistência, para construção de vigas laminadas, como: C13-7E, C15-8E, C18-9E, C21-10E, C15-11E, C24-11E,

C30-12E, C21-13E, C37-14E e C30-15E. Os foram obtidos pela anotação dos valores da deformação, tomados em intervalos de 90 cm ao longo do comprimento total das tábuas de cada camada.

Tabela 04 Limites dos valores do MOE para cada classe de resistência definida

CLASSES DE RESISTÊNCIA	VALORES DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)
*C13-7E	7900 $\geq E \geq$ 4900
C15-8E	8990 $\geq E \geq$ 8000
C18-9E	9990 $\geq E \geq$ 9000
C21-10E	10900 $\geq E \geq$ 10000
C15-11E	11990 $\geq E \geq$ 11000
C24-11E	
C30-12E	E \geq 12000
C21-13E	
C37-14E	
C30-15E	

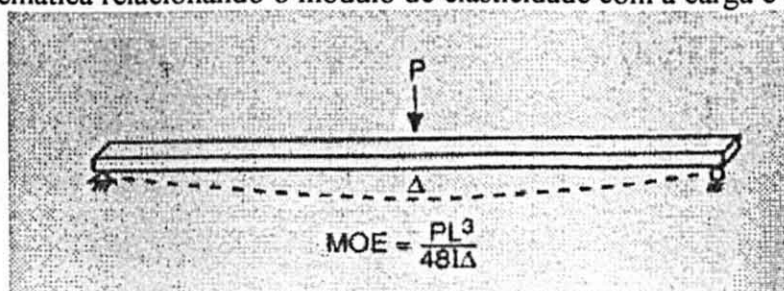
* Classe de madeira não constante das especificações CEN.

Como a classificação das tábuas foi realizada mediante a determinação do seu módulo de elasticidade, MOE, o primeiro passo foi a realização de testes preliminares nas tábuas objetivando classificá-las segundo sua rigidez, através do valor estimado de resistência à flexão, representado pela correlação entre o módulo de elasticidade e de ruptura, medidos na rápida flexão do processo mecânico não destrutivo.

Como já foi citado, o teste de classificação pelo processo mecânico não destrutivo (NDT), foi realizado através da determinação do módulo de elasticidade médio, medido na face maior da tábua, em 4 pontos, em intervalos de 90 cm. Porém, por serem considerados críticos, os pontos centrais da tábua, foram também avaliados, o módulo de elasticidade médio, determinado em dois pontos médios centrais de cada tábua.

O teste consistiu em aplicar uma carga constante na face maior da tábua, posicionada no equipamento de classificação mecânica, apenas sobre dois roletes inferiores os quais se comportaram simplesmente como apoios, mantendo a correta posição da tábua.

Figura 07 Esquema de aplicação da carga na máquina de classificação estrutural
 Uma peça simplesmente apoiada, carregada no meio do vão e a equação matemática relacionando o módulo de elasticidade com a carga e a deflexão.



-----90 cm-----
 Fonte: ROSS e PELLERIN (1994).

A determinação da carga constante, específica para cada espécie, com base no princípio de que a resistência da madeira a um determinado esforço, aumenta com o peso específico, e com a condição de que essa carga não ultrapasse o limite de elasticidade das tábuas com defeitos, foi realizada de acordo com estudos desenvolvidos por IWAKIRI (1982).

Observou-se também que, para a classificação de tábuas de pouca espessura o equipamento utilizado, destinado à classificação de madeiras de bitolas maiores, acima de 5,0 cm, apresentava grande influência nos valores da deformação, quando presas pelo dispositivo de fixação mecânica do equipamento. Estabeleceu-se assim, que, para classificação de peças de pequenas espessuras, a adaptação do mecanismo para a determinação da flecha deveria ser realizada pela simples simulação do teste de flexão estática, que possibilita a determinação da deformação real, não devendo, portanto, ser utilizado o dispositivo de fixação do classificador mecânico no material a ser testado.

Com as deformações medidas, conhecendo-se a magnitude das cargas e as propriedades geo-métricas das peças, determinou-se o módulo de elasticidade médio de cada peça de madeira, que expressa numericamente a sua rigidez, com dois apoios e um ponto de aplicação de carga, através da fórmula elementar da resistência dos materiais, indicada por ROSS e PELLERIN (1994):

$$MOE = \frac{P' \cdot L^3}{48 \cdot \Delta \cdot I} \Rightarrow MOE = \frac{P' \cdot L^3}{4 \cdot \Delta \cdot b \cdot h^3} \quad (3.05)$$

sendo:

MOE = módulo de elasticidade (N/cm²)

P' = carga no limite proporcional pré-determinado em teste de flexão estática, em corpos de prova livres de defeitos, de 2 x 2 x 30 cm (N).

L = comprimento do vão (fixado em 90 cm);

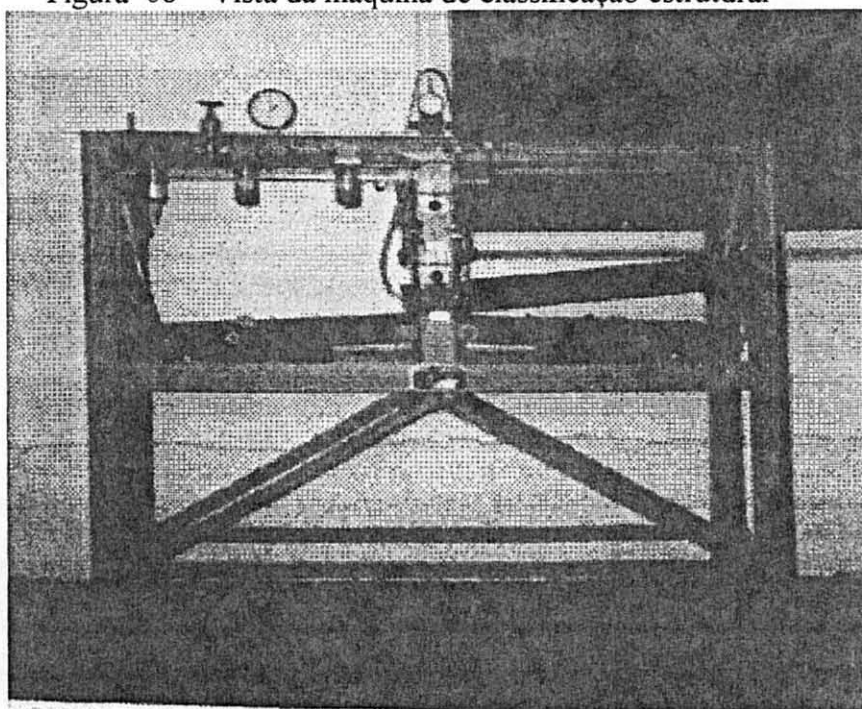
I = momento de inércia da seção da tábua (cm⁴);

b = largura da tábua (cm);

h = espessura da tábua (cm);

Δ = deformação verificada (cm).

Figura 08 Vista da máquina de classificação estrutural



De acordo com os valores dos módulos de elasticidade determinados, foram encontradas dez classes de qualidade representativas da população. Os limites para os graus de qualidade definidos, são apresentados na tabela 06, do item 4.

3.5 POSICIONAMENTO DAS TÁBUAS NAS VIGAS

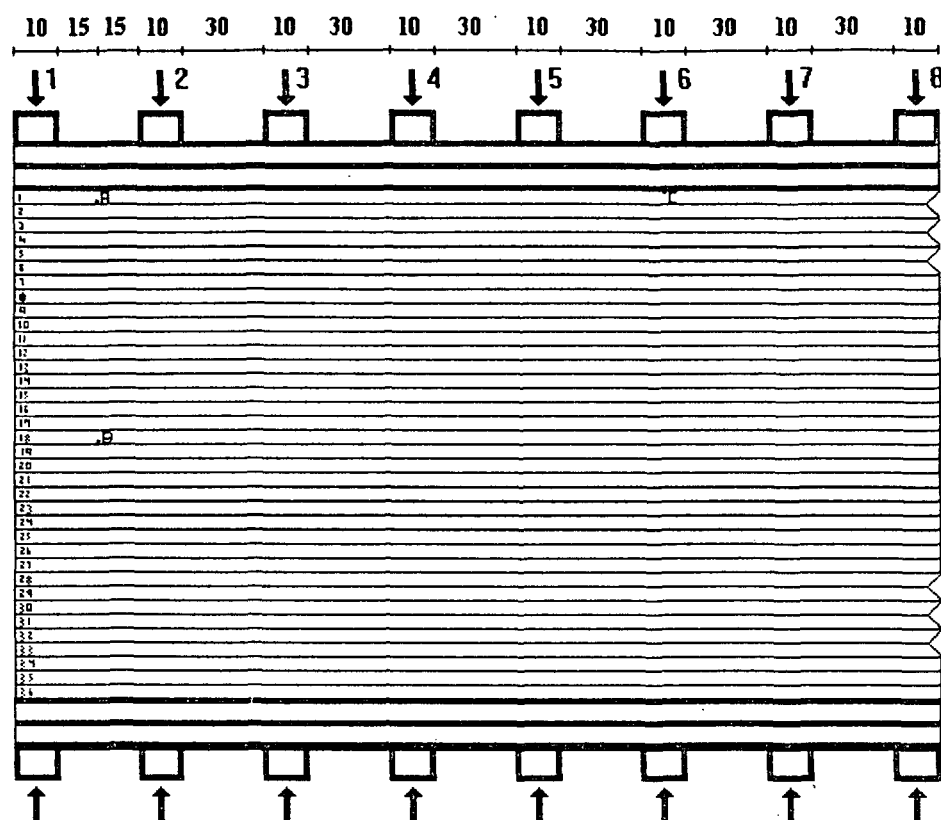
A partir dos testes de classificação das tábuas pelo módulo de elasticidade, foi possível estabelecer o seu posicionamento nas vigas. Procurou-se colocar as tábuas de maior rigidez nas áreas submetidas a valores de maior tensão, ou seja, nas partes externas da viga e consecutivamente nas camadas seguintes. Contudo, em função da pouca disponibilidade do material em determinadas classes, devido a defeitos e emendas localizados em posições críticas centrais das tábuas, em muitas vigas não foi possível um perfeito posicionamento das tábuas segundo a sua rigidez.

3.6 SISTEMA DE PRENSAGEM

Para a confecção das vigas laminadas deste estudo, foram utilizadas as prensas da empresa PREMONTAL-Construções Premontadas Ltda. As prensas são basicamente constituídas de suportes compostos de parafusos. A aplicação da pressão foi feita sobre uma peça de madeira colocada transversalmente à viga de madeira laminada, denominada de travessa, através de parafusos com arruelas e porcas. Para melhor distribuição da pressão, foram colocados na parte superior e inferior da viga, uma prancha de madeira aparelhada, conforme apresentado no esquema da figura 09.

A pressão aplicada foi medida através de um torquímetro previamente calibrado, determinado para exercer uma pressão mínima em qualquer ponto da linha adesiva de 600.10^3 N/m^2 .

Figura 09 Representação esquemática da aplicação de carga na prensa com vigas

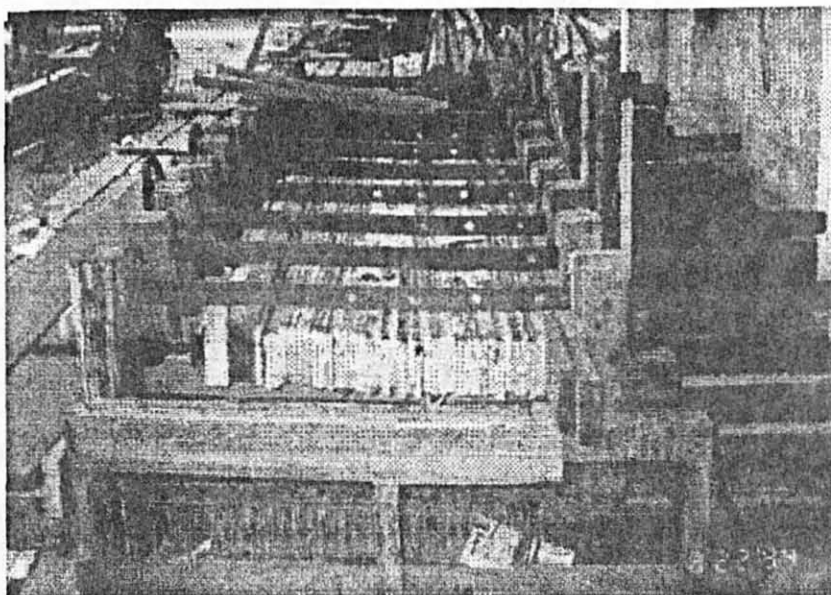


3.7 MONTAGEM DAS VIGAS

Após a preparação da superfície, antes da aplicação do adesivo, as tábuas foram posicionadas na peça laminada de acordo com os valores de seu módulo de elasticidade médio, com as emendas localizadas segundo as especificações já citadas, de seis vezes a espessura no espaçamento mínimo horizontal entre as emendas e no sentido vertical, também foi observado o maior espaçamento possível.

Na operação seguinte, foi aplicado manualmente o adesivo nas duas faces das tábuas, e imediatamente levadas à prensa, na mesma sequência da montagem prévia, observando-se o tempo de montagem em aberto recomendado pelas especificações do fabricante de adesivos.

Figura 10 Vista parcial da prensagem das vigas



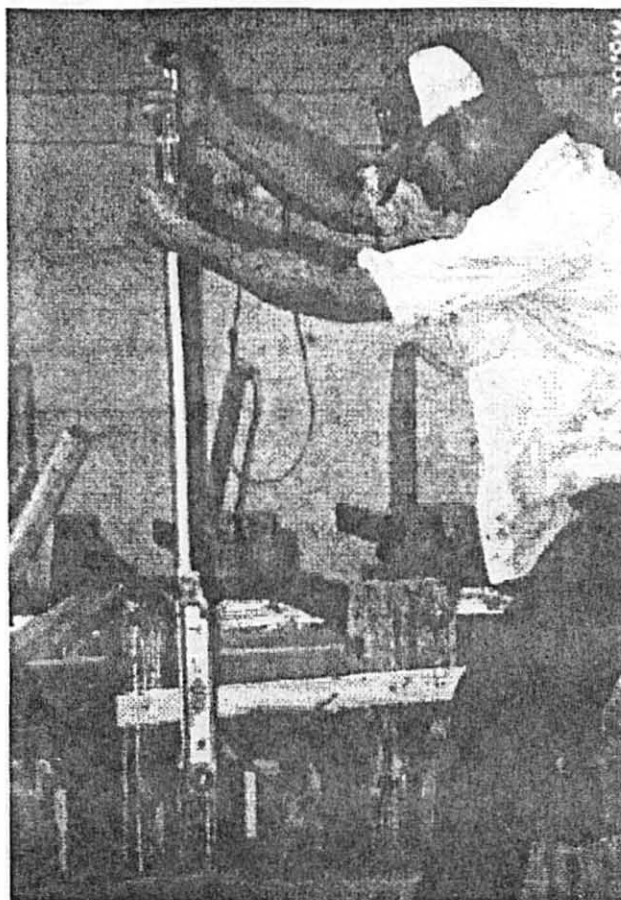
3.8 APLICAÇÃO DA PRESSÃO

O sistema utilizado, permitiu a prensagem simultânea de três vigas, colocadas uma paralela à outra e transversalmente ao parafuso de aplicação da pressão.

A pressão foi aplicada por quatro operários, através de um torquímetro previamente calibrado para 4,0 kN, iniciando-se da parte central para as extremidades das vigas, após o período de montagem que variou em função da temperatura, em média de 50 minutos e, após serem colocadas as tábuas de distribuição. Devido a acomodação das tábuas sob pressão, após 30 minutos, foi feita a verificação da pressão nos parafusos.

As vigas foram mantidas sob pressão durante um período de 12 horas e retiradas para completarem o período necessário de cura, de no mínimo dez dias.

Figura 11 Verificação da pressão aplicada, com o torquímetro



3.9 MODELOS DE VIGAS CONSTRUIDAS

Para as diversas classes de tábuas estabelecidas, foram elaborados oito modelos de montagem das vigas, sendo sete homogêneas (LH10, LH15, LH20, LH25, LH28, LH30 e LH38) e uma combinada (LC24), a qual foi produzida utilizando as classes C15-8E e C18-9E e não as classes especificadas na norma CEN, em função do material disponível.

Todas as vigas foram construídas com doze camadas de tábuas de 18 mm de espessura, resultando em modelos de 23 cm de altura, 13 cm de largura e comprimento médio de 4 m. Um total de 28 vigas foram confeccionadas, conforme as combinações indicadas na figura 12.

Figura 12 Seção transversal das vigas confeccionadas e testadas

C13-7E
C13-7E
C13-7E
C13-7E
C13-7E
C13-7E
C13-7E
C13-7E
C13-7E
C13-7E
C13-7E
C13-7E

LH10-LH15

C15-8E
C15-8E
C15-8E
C15-8E
C15-8E
C15-8E
C15-8E
C15-8E
C15-8E
C15-8E
C15-8E
C15-8E

LH20

C18-9E
C18-9E
C18-9E
C18-9E
C18-9E
C18-9E
C18-9E
C18-9E
C18-9E
C18-9E
C18-9E
C18-9E

LH25

C21-10E
C21-10E
C21-10E
C21-10E
C21-10E
C21-10E
C21-10E
C21-10E
C21-10E
C21-10E
C21-10E
C21-10E

LH28

VIGAS HOMOGÊNEAS

C15-11E
C15-11E
C15-11E
C15-11E
C15-11E
C15-11E
C15-11E
C15-11E
C15-11E
C15-11E
C15-11E
C15-11E

LH30

FORAM
REUNIDAS
AS
CLASSES:
C30-12E
C21-13E
C37-14E
e
C30-15E

LH38

C18-9E
C18-9E
C18-9E
C15-8E
C15-8E
C15-8E
C15-8E
C15-8E
C15-8E
C15-8E
C18-9E
C18-9E

LC24

VIGAS HOMOGÊNEAS

VIGA COMBINADA

Figura 13 Vista parcial de algumas vigas, antes de serem ensaiadas.

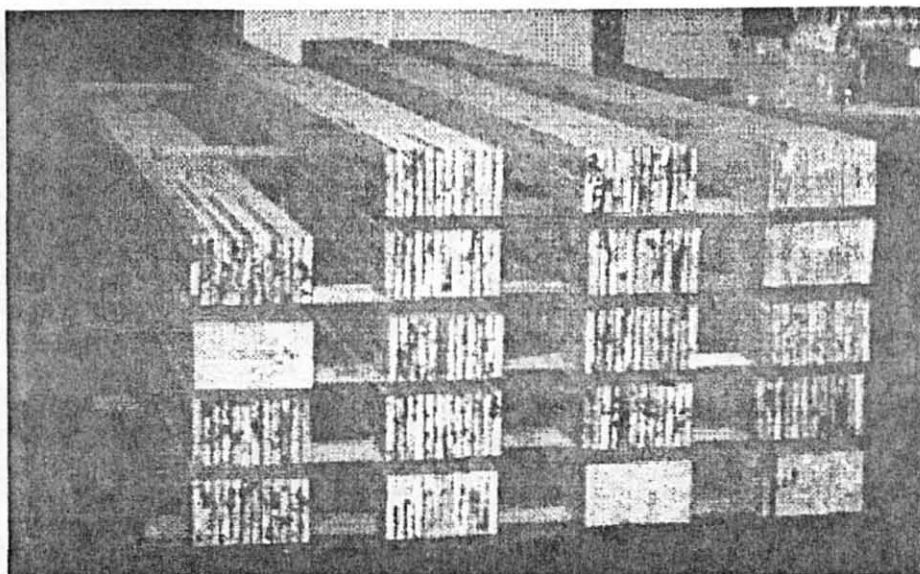


Tabela 05 - Classificação das vigas construídas e quantidade de modelos

MODELO DAS VIGAS	CLASSE DE RESISTÊNCIA VIGAS HOMOGÊNEAS	CLASSE DE RESISTÊNCIA VIGAS COMBINADAS	QUANTIDADE DE MODELOS
*LH10	C13-7E	-	3
*LH15	C13-7E	-	4
*LH20	C15-8E	-	5
LH25	C18-9E	-	3
LH28	C21-10E	-	3
LH30	C15-11E	-	3
LH38	C30-12E, C21-13-E, C37-14E, C30-15E	-	3
LC24		C15-8E / C18-9E	4

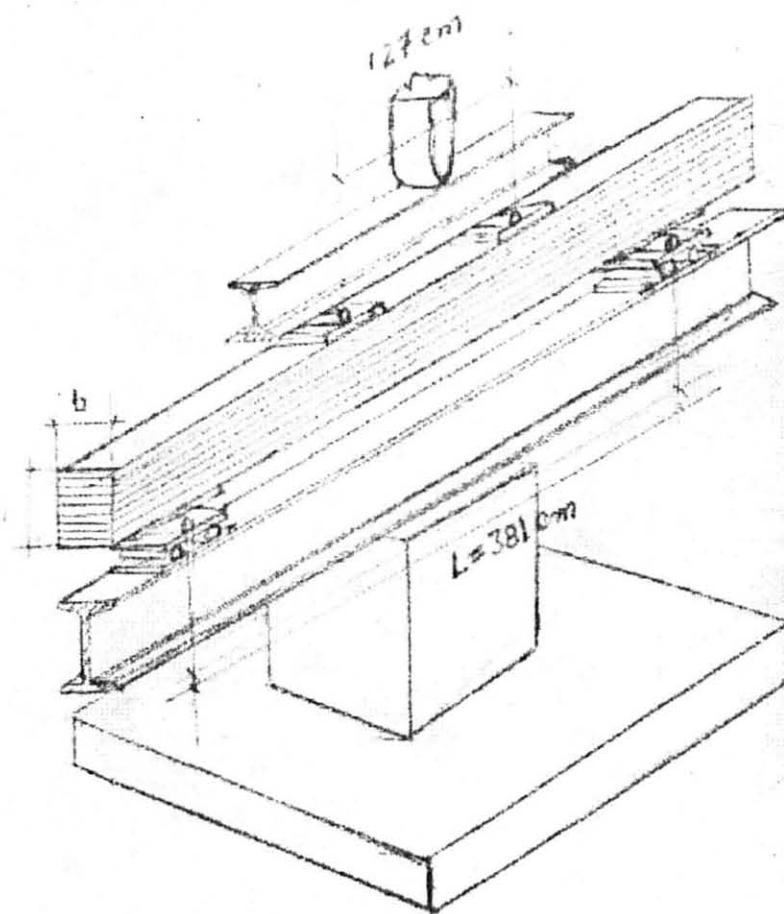
* Modelos de vigas construídos por adaptação, com classes de madeira excluídas pela CEN.

3.10 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

As vigas foram ensaiadas no laboratório do Departamento de Engenharia e Tecnologia Rurais, da Universidade Federal do Paraná, em uma máquina universal de ensaios, marca Tinius Olsen, com instrumentação e suportes especiais para testar vigas de 4,0 m de comprimen-

to, conforme esquema apresentado na figura 14, de acordo com os procedimentos indicados pela norma ASTM D 198 -67, Static Tests of Timbers in Structural Sizes, da American Society for Testing and Materials.

Figura 14 - Esquema do ensaio das vigas



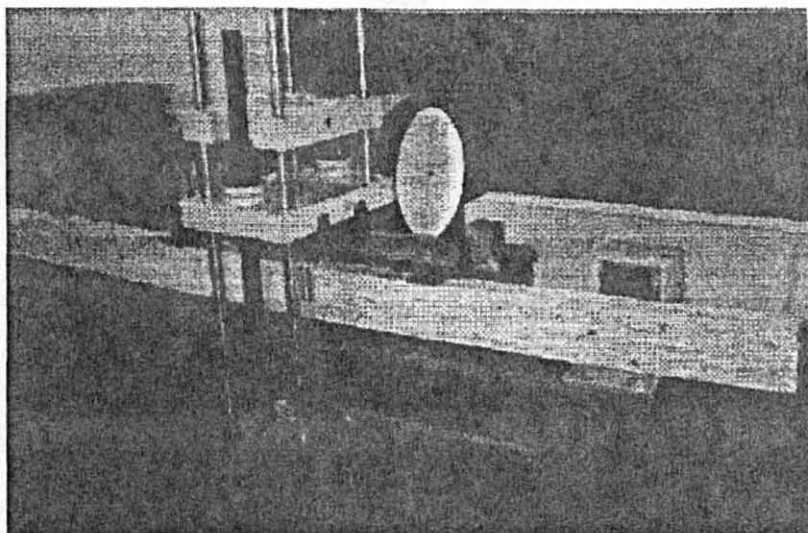
Fonte : ASTM D 198-27

Muitos ensaios dos elementos estruturais de madeira serrada, tem sido conduzidos de acordo com o método indicado pela norma americana ASTM D 198-27. Esta norma, inicialmente recomendada para material serrado, como a madeira sólida de pontes e vigas, foi posteriormente ampliada, com o advento da madeira laminada, composição de peças de madeira

compensada e mesmo de peças reforçadas de madeira prensada, com adaptações de procedimentos para uma ampla variedade de peças estruturais de madeira.

As peças estruturais, vigas laminadas de seção retangular, foram ensaiadas em flexão estática, com a viga posicionada simetricamente sobre dois apoios, com 381 cm de vão e distância de 127 cm entre os dois pontos de aplicação da carga. O ensaio e a aquisição de dados foram automatizados, sendo programada a aquisição de leitura dos dados de carga e da deformação por computador, a intervalos constantes de tempo, figura 15. O carregamento foi contínuo, até a ruptura, com uma velocidade de 3,5 mm/ minuto, considerando-se um tempo médio de 15 minutos entre o início de aplicação da carga até a ruptura. Foram feitas observações individuais de cada ruptura.

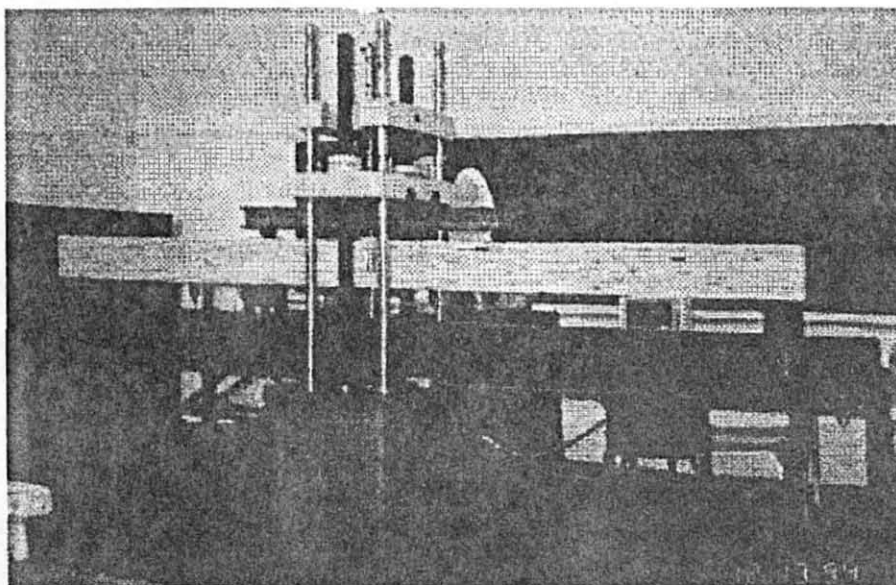
Figura 15 Vista do sistema de aplicação da carga e de leitura dos dados, nos teste de flexão estática das vigas laminadas.



A carga aplicada, foi medida através de uma célula de carga, previamente calibrada. Para a medida das deformações foi utilizado um deflectômetro conectado à máquina de ensaios, sendo assim a leitura automatizada por computador.

As leituras, a cada intervalo de carga, foram armazenadas em computador, para posterior análise. Em cada ensaio, foram realizadas 100 leituras por minuto, da deformação e da carga correspondente. Após a ruptura, foi determinado o teor de umidade de cada viga.

Figura 16 Vista geral do esquema de realização do ensaio das vigas laminadas



3.11 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Os cálculos foram efetuados utilizando-se as fórmulas recomendadas pela norma adotada para os ensaios. Com os valores determinados para cada viga individual, foram obtidos os valores da média para cada tratamento, da variância e do coeficiente de correlação entre o módulo de elasticidade médio das tábuas com o módulo de elasticidade das vigas de todas as classes estabelecidas.

A análise estatística foi realizada considerando-se a função de distribuição da frequência como normalmente distribuída, conforme diversos estudos realizados, utilizando-se assim, a teoria relativa a essa distribuição e adotando-se o seguinte modelo de regressão linear:

$$y = a + bx \quad (3.06)$$

onde,

y = variável dependente (MOE da viga)

x = variável independente (MOE médio das tábuas)

a = parâmetro referente à interseção da reta com o eixo y

b = parâmetro referente à inclinação da reta.

As variáveis independentes foram testadas com base na equação (3.06) proposta por diversos autores, entre eles KRAMER (1964), HILBRAND e MILLER (1966) e WALTERS e REISS (1977).

Para a regressão linear simples, foram calculados os valores de (F), do coeficiente de determinação (R^2) e do coeficiente de correlação (R). A escolha da equação como modelo estimador do módulo de elasticidade da viga (MOE_{viga}) foi efetuada com base nos coeficientes de determinação e nos testes “F” e “t”, ao nível de 99% de probabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CLASSES DA MADEIRA

Os valores do módulo de elasticidade, determinados na classificação mecânica não destrutiva, utilizados para o estabelecimento das classes de madeira, considerado como um dos parâmetros efetivos, como estimador da resistência da madeira por HOYLE (1961) e HILBRAND e MILLER (1966), demonstraram ser adequados para o material estudado, indicando que as classes definidas corresponderam aos valores esperados para o módulo de elasticidade das vigas laminadas produzidas com a metodologia empregada. Os resultados obtidos na classificação das tábuas foram sumarizados na tabela 06 a seguir apresentada:

Tabela 06 Resultado da classificação mecânica das tábuas pelos seus valores médios do E, determinados em quatro pontos, em intervalos de 90 cm, em cada tábua.

CLASSE DE RESIST.	VALORES DO MÓDULO DE ELASTICIDADE			COEF. DE VARIAÇÃO CV (%)	QUANTID. DE TÁBUAS
	MAXIMO	MINIMO E (MPa)	MEDIA		
*C 13-6E	6815	4424	6114	9,53	38
*C 13-6E	7829	6882	7391	3,78	53
C 15-8E	8825	7918	8388	3,45	78
C 18-9E	9780	8848	9339	2,62	63
C21-10E	10720	9814	10279	2,71	35
C15-11E	11760	10796	11188	2,59	33
C30-12E	12490	11796	12188	1,58	13
C21-13E	13728	12842	13215	2,24	9
C37-14E	14677	13730	14221	2,37	7
C30-15E	17421	14800	15706	5,19	7

* Tábuas que não alcançaram classes de resistência especificadas pela CEN

Com base nos resultados apresentados na tabela 06, podem ser feitas algumas observações:

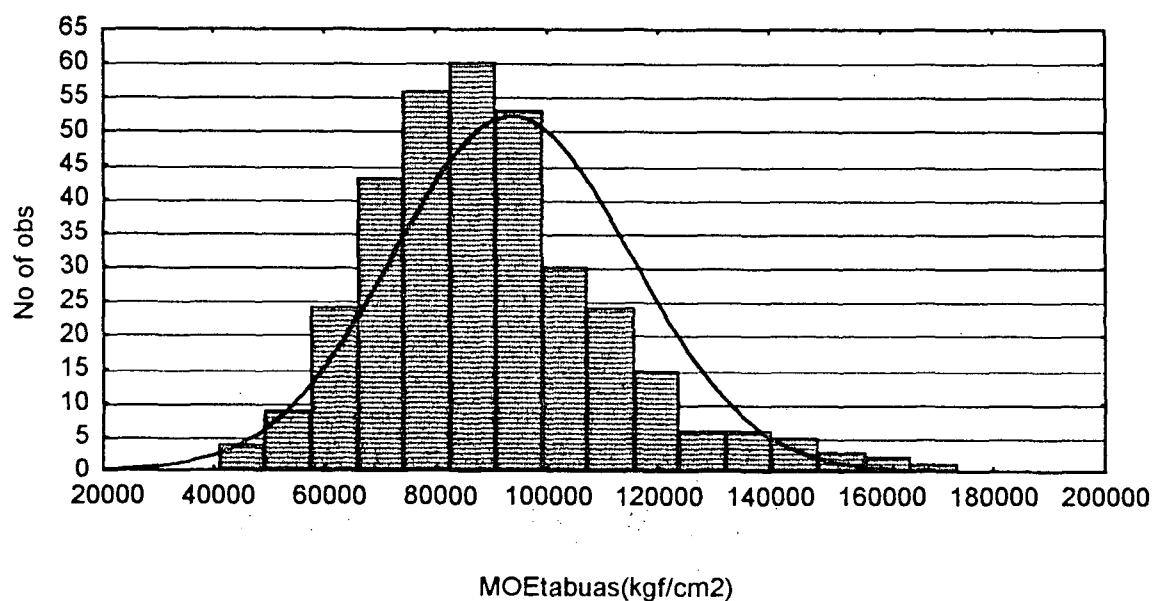
A população de origem da madeira indicou maior concentração nas classes consideradas de baixa resistência.

Do número total de tábuas classificadas com base no módulo de elasticidade paralelo médio, um dos parâmetros adotados pela norma CEN para definição das 12 classes de madeira, foram alcançadas 10 das classes iniciais de qualidade. Os resultados foram considerados satisfatórios considerando-se a provável diferença existente entre as propriedades da madeira da espécie estudada, produzida no Brasil e na Europa.

As classes de madeira determinadas incidiram, em sua maioria, nos níveis inferiores de classificação, segundo valores requeridos pelas especificações da CEN. Alguns dos parâmetros requeridos pela mesma norma, para determinação das classes de resistência, foram utilizados no presente estudo apenas para caracterização do material empregado na confecção das vigas, como propriedades físicas e mecânicas da madeira, e são discutidos no item correspondente aos corpos de prova. Um histograma da distribuição do módulo de elasticidade médio, para a população de tábuas, é mostrado na figura 17.

Figura 17 Distribuição do módulo de elasticidade médio das tábuas

Histograma de Frequencia e Distribuicao
(Modulo de Elasticidade das Tabuas)



Todas as tábuas foram utilizadas na confecção das vigas, embora uma percentagem relativamente pequena, incidisse nas classes de qualidade admitida pela norma CEN, para fabricação de vigas laminadas, conforme demonstrado na tabela 07.

Tabela 07 Classes de madeira requeridas para as vigas homogêneas (LH).

Classificação das vigas e classe de resistência das tábuas definidas pela CEN							
-Classe de resistência para vigas homogêneas			LH25	LH28	LH30	LH35	LH40
-Classe de resistência requerida para tábuas			C18-9E	C21-10E	C24-11E	C30-12E	C37-14E
Classificação das vigas e classe das tábuas alcançado com base no MOE médio paralelo							
-Classe de MOE médio para vigas homogêneas	LH10	LH15	LH20	LH25	LH28	LH30	LH38
-Classe de MOE médio requerido p/ as tábuas	C13-7E	C13-7E	C15-8E	C18-9E	C21-10E	C15-11E	C30-12E, C21-13E, C37-14E, C30-15E.

Na tabela 2 da EN TC 124.203, reproduzida no anexo 4, são indicadas as propriedades de resistência e rigidez requeridas para serem aceitas na classificação. Observando que as designações utilizadas referem-se a resistência característica à flexão e ao módulo de elasticidade médio à flexão requeridos, por exemplo:

LH25 = viga laminada homogênea com resistência característica à flexão de 25 MPa.

C18-9E = classe de tábuas com resistência característica à flexão de 18 MPa e módulo de elasticidade médio de 9000 MPa.

Na tabela 07 pode ser observado que apenas as classes de tábuas com valores do módulo de elasticidade mais altos, a partir de C18-9E, são empregadas na produção de vigas. Contudo, foi possível obter um parâmetro comparativo dos valores de rigidez, pelo módulo de elasticidade das vigas homogêneas das classes LH25, LH28 e LH30, as quais foram construídas de acordo com a classe de madeira indicada pelas especificações CEN. Os resultados alcançados pelas vigas podem ser considerados bons, atingindo valores do módulo de elasticidade de 86%, 80% e de 78%, respectivamente, dos valores requeridos pela mesma norma, transcrita no anexo 4.

Para as vigas da classe de resistência LH38, foram reunidas as tábuas que alcançaram as classes C30-12E, C21-13E, C37-14E e C30-15E.

Tabela 08 - Classes de madeira requeridas para as vigas laminadas combinadas (LC).

	Classificação definida pela CEN					Classificação realizada
Classe de resistência para vigas combinadas	LC24	LC26	LC28	LC33	LC38	LC24
Classe de resistência para as tábuas:						
•camadas externas	C18-9E	C21-10E	C24-11E	C30-12E	C37-14E	C18-9E
•camadas internas	C13-7E	C15-8E	C18-9E	C21-10E	C24-11E	C15-8E

Em função da quantidade do material disponível nas classes, foi possível compor apenas uma classe de viga laminada combinada, a LC24, com o material que obteve os valores do módulo de elasticidade entre 8000 e 9000 MPa, das classes de resistência C15-8E e C18-9E, respectivamente.

4.2 PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E DE RIGIDEZ

4.2.1 CORPOS DE PROVA LIVRES DE DEFEITOS

Os valores das propriedades físicas e mecânicas, determinados em corpos de prova livre de defeitos, para a caracterização da madeira utilizada neste estudo, são apresentados no quadro 4.04, sendo que foram efetuadas as seguintes observações:

- O valor médio da massa específica aparente, dos corpos de prova dos ensaios de compressão paralela e de flexão estática foi de 496 kg/m^3 ($4,86 \text{ kN/m}^3$), respectivamente. Estes valores são comparáveis aos valores da massa específica apresentados por estudos relacionados à norma CEN, citados anteriormente, estabelecidos por FOSLIE e MOEN (1968) em 491 kg/m^3 e por FALK, SOLLI e AASHEIM (1991) em 482 kg/m^3 . Os valores da massa específica

requeridos pelas especificações da EN TC 124.203 - Classes de Resistência para Madeiras Estruturais, variam de 290 kg/m^3 para a classe de menor resistência C13-7E, até 700 kg/m^3 para a classe C60-22E, de maior resistência. O coeficiente de variação médio determinado foi de 12,53%. Os valores médios e as variações verificadas são também comparáveis aos apresentados na literatura por diversos autores, entre eles KOCH (1972), TOMASELLI (1979) e MUÑIZ (1993) e com os valores previstos para utilização nos cálculos deste estudo.

- O teor de umidade verificado nos corpos de prova para o ensaio da linha de cola à tração, submetidos ao condicionamento para o teor de umidade nominal de 12%, foram avaliados pelo método da pesagem, apresentando um teor de umidade médio de 11,23% e coeficiente de variação de 0,49%, indicando alta homogeneidade e constatando-se o correto condicionamento de todos os corpos de prova.

- Os valores do módulo de elasticidade determinado nos testes de flexão estática, como era esperado, alcançaram os mesmos intervalos de classe estabelecidos na classificação das tábuas. O valor médio obtido foi de 7566,92 MPa, apresentando coeficiente de variação entre os corpos de prova, considerados altos, de 36,24%. O valor médio determinado para o módulo de ruptura foi de 30,88 MPa, com o coeficiente de variação de 23,11%, também considerado alto, porém dentro dos limites observados em outros estudos, como de KOCH (1972), BENDTSEN (1978) e MUÑIZ (1993), para o tipo de teste realizado e para a espécie de madeira estudada, em função da ocorrência de diferentes percentagens e espessuras de anéis de crescimento em corpos de prova, de pequenas dimensões.

- Os corpos de prova ensaiados à compressão paralela, apresentaram resistência média de 32,89 MPa, que comparado com os valores requeridos para a classificação da madeira, pela norma EN TC 124.203 - CEN, com a mesma propriedade de resistência característica à compressão paralela, alcançou uma das classes de maior resistência (C48-20E). O coeficiente de

variação observado foi de 16,53%, considerado dentro dos limites já observados em outros estudos como o de MUÑIZ (1993).

Tabela 09. Propriedades físicas e mecânicas das tábuas de Pinus taeda, utilizadas na montagem das vigas laminadas. Caracterização do material utilizado-corpos de prova livres de defeitos

ENSAIO	PROPRIEDADES	\bar{x}	S	C.V.
COMPRESSÃO PARALELA	Teor de Umidade (%)	CONDICIONADOS À 12%		
	Massa Específica Aparente (kN/m^3)	5,05	0,55	10,85
	Carga máxima (MPa)	20,63	3,43	16,60
	Tensão de Ruptura (MPa)	32,89	5,43	16,53
FLEXÃO ESTATICA	Teor de Umidade (%)	CONDICIONADOS À 12%		
	Massa Específica Aparente (kN/m^3)	4,68	0,66	14,22
	Carga no Limite Proporcional (MPa)	6,03	1,76	29,19
	Módulo de Elasticidade (MPa)	7566,92	2742,56	36,24
	Módulo de Ruptura (MPa)	30,88	7,13	23,11
LINHA DE COLA À TRAÇÃO (EMENDAS BISELADAS)	Teor de Umidade (%)	11,23	0,49	4,39
	Carga Máxima (N)	5788,44	1587,00	27,41
	Tensão de Ruptura (MPa)	3,87	1,06	27,42

\bar{x} = Média

s = Desvio padrão

C.V. = Coeficiente de variação

Os resultados dos ensaios de caracterização da madeira utilizadas na confecção das vigas laminadas, são apresentados em quadros nos anexos, evidenciando-se as propriedades de resistência e de rigidez da madeira utilizada no estudo.

Os testes realizados nas emendas biseladas confirmaram a boa adesividade da madeira, em função de sua permeabilidade e pressão de colagem adequada, De acordo com HELLMEISTER e NEIVA (1989) as espécies de madeira de pinus tem o menor tempo de penetrabilidade do adesivo, em relação ao tempo necessário a outras madeiras e, à pressão de colagem apropriada, produz melhores resultados na tensão de ruptura ao cisalhamento.

Os valores obtidos nos testes realizados nas emendas apresentaram resistência média da linha de cola à tração de 3,87 MPa, sendo os resultados considerados baixos, comparados com os valores de outros estudos já realizados com a espécie de *Araucária angustifolia* por

MANTILLA (1984) de aproximadamente 8,0 MPa. Foram porém, superiores ao valor médio da tensão de ruptura da madeira no teste de flexão, realizado em corpos de prova livre de defeitos, pois as rupturas ocorreram principalmente na madeira e não na linha adesiva dos corpos de prova, assegurando, assim, o nível de resistência necessário ao efeito dominante das emendas, na resistência das vigas laminadas. O teor de umidade médio apresentado, foi de 11,23%, representando o mesmo teor de umidade das vigas laminadas na ocasião dos testes.

4.2.2 VIGAS LAMINADAS

Os valores das propriedades de resistência e de rigidez das vigas laminadas, foram ajustados ao teor de umidade de 12%. Foram calculados os valores médios obtidos por classe de viga, e comparados aos valores requeridos em tabela pela EN TC 124.207 - CEN. Foram também determinados outros parâmetros como o desvio padrão (σ), o coeficiente de variação (CV), a razão entre o desvio padrão e o valor médio das propriedades determinadas em percentuais e, a dispersão dos resultados (D), que é a diferença entre o maior e o menor valor observado.

Os resultados obtidos foram sumarizados por propriedade e são, a seguir, apresentados em tabelas.

4.2.2.1 MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL (E)

A partir dos pares de valores, carga-deformação, foram determinados através da equação adotada pela ASTM D 198-67, observando-se a relação vão/altura da viga determinada pela mesma especificação de $14 < L/h < 21$.

Tabela 10 Valores do Módulo de elasticidade (MPa), ajustados ao teor de umidade de 12%. Comparativo dos resultados médios determinados nos testes de flexão estática das vigas laminadas, com os valores requeridos pela CEN.

CLASSE DAS VIGAS								
	LH10	LH15	LH20	LH25	LH28	LH30	LH38	LC24
valores obtidos	6260,70	7141,76	7625,07	8583,71	8801,23	8982,29	10666,01	9203,34
valores requeridos	-	-	-	10000	11000	11500	12500	9500
percentual alcançado	-	-	-	86%	80%	78,11%	85%	97%
desvio padrão (σ)	867,87	169,01	562,42	399,31	437,67	207,05	488,76	476,50
coeficiente de variação (CV)	13,86%	2,37%	7,38%	4,65%	4,97%	2,31%	4,58%	5,18%
dispersão dos valores (D)	2109,09	407,68	1515,61	963,76	970,78	439,60	1069,78	1269,58

Os valores do módulo de elasticidade, que expressam numericamente a rigidez das vigas, foram determinados a partir da carga no limite proporcional e da deflexão da viga neste ponto. Estes valores estão relacionados aos esforços de tensão, aplicável apenas dentro do limite elástico, ou seja, o limite proporcional é determinado no diagrama carga-deformação no ponto de inflexão, onde a linearidade perceptivelmente deixa de existir WANGAARD (1950), CHUGG (1964) e KOLLMANN e COTÉ (1968). É, portanto, o ponto exato onde se iniciam as deformações plásticas, de difícil detecção, passíveis de pequenas imprecisões, para o caso das vigas de madeira laminada em tamanho estrutural. Além disso, deve-se considerar que, para a madeira, como um material orgânico e anisotrópico, de forma geral, são fatores que podem influenciar nos resultados de forma significativa e em cada viga de forma peculiar.

Com base nos resultados da tabela 10, é possível observar que:

- Há um evidente aumento nos valores do módulo de elasticidade com a classificação da madeira, para as classes de níveis superiores.
- A dispersão entre os valores experimentais observados ocorreu em todos os níveis, abrangendo todas as classes de vigas, indicando que mesmo nas classes de vigas, com classificação superior, ocorre o mesmo nível de influência dos fatores característicos à madeira.

Contudo, a maior variação nos valores observados, ocorreu na classe inicial inferior, indicando que para a produção de vigas laminadas com previsão de resistência, dentro de determinados limites padrões, devem ser observados certos níveis de rigidez da madeira, que no presente estudo é de 7000 MPa.

- Não existe relação aparente entre a dispersão dos valores experimentais e os níveis das classes da madeira.

- os valores experimentais, obtidos para as vigas homogêneas LH's, comparados aos valores requeridos pela especificação adotada, alcançaram praticamente em todas as classes comparadas, a mesma média percentual de 80% dos valores, um pouco abaixo dos valores recomendados para a classificação proposta. Fato este que pode ser atribuído aos defeitos admitidos na classificação visual e à qualidade da madeira, desenvolvida em condições brasileiras.

- Para a viga combinada LC, obteve-se um percentual comparativo maior, de 97% em relação ao valor do módulo de elasticidade requerido pela CEN. Isto ocorreu, possivelmente devido à uma das duas classes do material utilizado na montagem combinada da viga, ser de nível imediatamente superior ao recomendado pela especificação. Contudo, os valores alcançados indicaram um aproveitamento muito mais eficiente do que as vigas homogêneas testadas. Pois, empregando-se apenas a metade das tábuas de melhor classificação (C18-9E), uma das duas classes indicadas para a composição combinada da viga, obtiveram-se resultados acima de 10% melhores que os obtidos para as vigas homogêneas, totalmente composta do mesmo material.

- Com relação aos resultados obtidos em experiências anteriores no Brasil, por CALLIA (1958), os valores determinados encontram-se bem abaixo dos recomendados, para a espécie de *Araucária angustifolia*, de 12000 MPa.

- Em outro estudo realizado por MANTILLA (1989), com os dados da linha elástica determinados num ensaio de flexão, foram obtidos através da regressão linear simples, valores próximos aos determinados por CALLIA, acima de 15000 MPa, para a mesma espécie de *Araucária*.

- Para a espécie em estudo, o maior valor médio alcançado de aproximadamente 10650 MPa, pode ser considerado satisfatório, observando-se as características de resistência e de rigidez da madeira utilizada.

4.2.2.2 MÓDULO DE RUPTURA

Como mencionado anteriormente, o valor do módulo de ruptura é apenas comparativo, não é influenciado pela relação L/h, segundo ROCCO L.(1983), e foi calculado através da equação convencional, adotada pela ASTM D 198-67:

Tabela 11-Valores médios do Módulo de ruptura (MPa), ajustados ao teor de umidade de 12%
Comparativo dos resultados médios determinados nos testes de flexão estática, das vigas laminadas, com os valores requeridos pela CEN.

CLASSES DAS VIGAS								
	LH10	LH15	LH20	LH25	LH28	LH30	LH38	LC24
valores obtidos	20,59	22,95	24,07	22,43	30,64	24,81	27,68	25,78
valores requeridos	-	-	-	25,00	28,00	30,00	38,00	24,00
percentual alcançado	-	-	-	89,71%	109,41%	82,71%	72,85%	107,40%
desvio padrão (σ)	2,09	1,74	2,35	2,56	4,95	0,54	1,38	3,88
coeficiente de variação (CV)	10,13%	7,59%	9,75%	11,41%	16,15%	2,16%	4,97%	15,06%
dispersão dos valores (D)	5,11	4,23	6,33	6,26	11,81	1,17	3,14	9,87

A característica do comportamento de uma viga de madeira à flexão é determinada pela diferença entre a resistência à tração e a resistência ao esmagamento à compressão da madeira. Porém, segundo KOLLMANN e COTÉ (1968), a proporção desta diferença que chega a 1,75 para a madeira de pinus comum européia, em condições secas ao ar, não é uma proporção exata da tensão de ruptura porque os testes usuais normatizados de resistência à flexão são computados através da fórmula de Navier. Tal fórmula baseia-se na suposição de que as ten-

sões são distribuídas linearmente e simetricamente sobre a seção transversal de uma viga fletida. Esta suposição é justificada apenas para vigas homogêneas e isotrópicas, sendo que para as vigas anisotrópicas de madeira só são fundamentadas acima do limite proporcional. Estas são as razões pelas quais, nos Estados Unidos, o termo “Módulo de Ruptura” é aceito como um critério resistência, ainda que não seja uma tensão real.

Ocorreram quatro principais tipos de rupturas nas vigas. A mais comum, ruptura por tração na camada externa tracionada, ocorreu em todas as vigas. As outras foram por compressão, próximo ao ponto de aplicação da carga; a ruptura por cisalhamento, ao longo do eixo longitudinal da viga e por delaminação da linha de cola. De forma geral ocorreram combinações destes quatro tipos de ruptura, com o colapso da viga causado não apenas por tração da camada externa, mas também, por cisalhamento e por delaminação nas vigas.

Pelos resultados apresentados na tabela 11, podem ser efetuadas algumas observações:

- Não existe aumento dos valores do módulo de ruptura com os níveis de classificação, indicando apenas, uma tendência de maior estabilidade dos valores nas classes superiores de classificação.

- Os resultados do módulo de ruptura obtidos para as vigas, foram em média 20% inferiores aos valores determinados na classe correspondente, em corpos de prova livre de defeitos. Tais resultados podem ser justificados pela influência dos defeitos presentes na viga e que são fatores minimizados em corpos de prova. Segundo BOHANNAN e MOODY (1969 e 1970), os nós reduzem consideravelmente o valor do módulo de ruptura das vigas de madeira submetidas à flexão, principalmente se estes defeitos estiverem localizados nas camadas tracionadas, próximos à parte central da viga. De acordo com KOLLMANN e COTÉ (1968), nós grandes localizados próximos à seção transversal crítica, apresentam maior influência na redução dos valores do módulo de ruptura do que a soma dos diâmetros de nós pertencentes a um mesmo grupo.

- Os valores médios experimentais de resistência não seguiram as mesmas tendências de dispersão da propriedade de rigidez, apresentando diversos níveis de variação, independente das classes de vigas.

- Não existe relação aparente entre o desvio padrão, o coeficiente de variação e a classificação das vigas.

- Os resultados experimentais, comparados aos valores requeridos pelas especificações CEN, alcançaram um percentual de quase 90% em média, sendo maior que os valores obtidos para o módulo de elasticidade. Praticamente todas as rupturas ocorridas foram atribuídas mais às características redutoras da resistência tais como nós e outros defeitos do que às emendas biseladas.

- Em todas as vigas ensaiadas, observou-se que as rupturas ocorreram nos estágios iniciais da deformação plástica, sem grande variação na proporção de deflexão, em relação ao limite proporcional, evidenciando assim, o comportamento à ruptura de um material de baixa resistência mecânica.

4.2.2.3 TENSÕES DE CISALHAMENTO

As tensões de cisalhamento longitudinais que são desenvolvidas na deformação de uma viga submetida à flexão simples, pelo deslizamento entre as fibras da madeira, podem ser determinadas através dos pares de valores de carga-deformação, e fórmulas convencionais, porém observando-se baixa relação vão/ altura da viga no teste de flexão.

Foram obtidos apenas os valores das tensões de cisalhamento máximas pois, os valores das deformações e a sua distribuição durante o ensaio na viga, são possíveis de serem determinados através de leituras, realizadas por extensômetros e transdutores magnéticos (LVDT) instalados em posições definidas da viga.

Os valores obtidos, indicados na tabela 12, foram determinados através da expressão (2.11), adotada pela ASTM D 198-67:

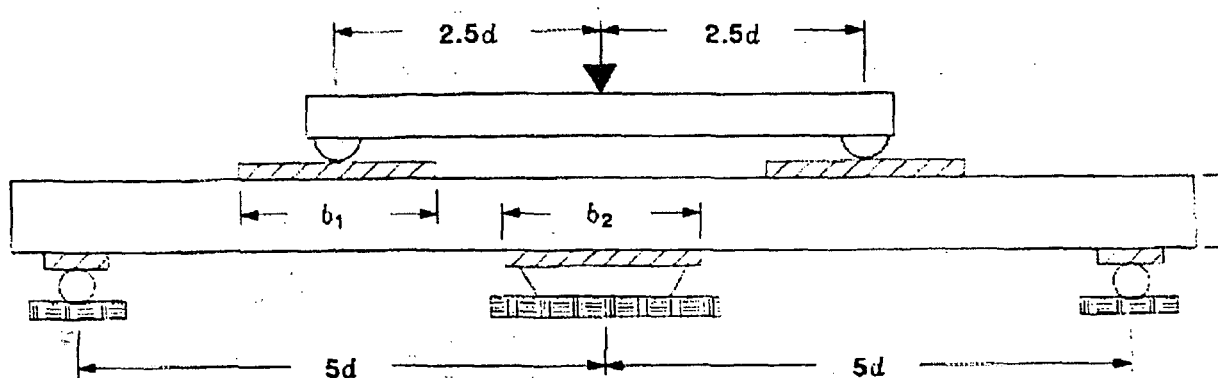
$$\tau_m = (3 / 4). (P / b.h) \quad \text{(equação 2.11)}$$

Tabela 12. Valores médios da tensão de cisalhamento (MPa), ajustados ao teor de umidade de 12%. Resultados determinados nos testes de flexão estática das vigas laminadas.

CLASSES DAS VIGAS								
	LH10	LH15	LH20	LH25	LH28	LH30	LH38	LC24
valores obtidos	0,95	1,04	1,09	1,01	1,39	1,13	1,25	1,17
valores requeridos	-	-	-	2,70	2,90	3,10	-	2,50
desvio padrão (σ)	0,08	0,08	0,11	0,11	0,22	0,03	0,06	0,17
coeficiente de variação (CV)	8,14%	7,59%	9,75%	11,41%	16,15%	3,11%	4,97%	15,06%
dispersão dos valores (D)	0,18	0,19	0,28	0,28	0,53	0,08	0,14	0,45

Os resultados experimentais obtidos, alcançaram apenas 40% dos valores requeridos pela CEN. Porém, como o objetivo dos testes era a determinação de outra propriedade (E), de rigidez, os procedimentos de ensaio podem ter tido influência nos resultados, principalmente no que se refere a relação L/h . De acordo com uma publicação mais recente, de RAMMER e SOLTIS (1994), as tensões e as rupturas por cisalhamento são avaliadas através do esquema representado na figura 18, com aplicação da carga em cinco pontos além de observar a relação vão/ altura da viga.

Figura 18. Esquema do sistema de testes de cisalhamento com aplicação da carga em 5 pontos



Fonte: RAMMER e SOLTIS (1994).

Em função da relação existente entre as equações empregadas, para determinar os valores das tensões de cisalhamento e do módulo de ruptura, a análise dos resultados foi considerada a mesma, para as duas propriedades.

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DOS ENSAIOS DAS VIGAS

Com o objetivo de relacionar o parâmetro de resistência das vigas à flexão, o valor de módulo de elasticidade, em função da classificação mecânica da madeira, foram utilizados os conceitos estatísticos correntes e comumente aceitos em engenharia de estruturas.

De forma geral, as 28 vigas laminadas testadas neste estudo, apresentaram rupturas esperadas, ou seja, na camada externa tracionada. Entretanto em uma das vigas, a ruptura foi iniciada por cisalhamento. Tal fato pode ser atribuído à influência dos defeitos presentes no local da ruptura.

A partir das leituras das deformações e do respectivo carregamento aplicado, foram calculados os valores dos módulos de elasticidade individuais de cada viga, para cada tratamento, e foram apresentados nos quadros em anexo, para os valores com teor de umidade na ocasião da realização do teste de flexão e os mesmos valores corrigidos para a umidade de 12%. De acordo com WANGAARD (1950), o ajustamento dos dados pode ser realizado através de fatores de correção, comumente citado na literatura para madeiras de coníferas, a proporção de 1,5% a cada 1% de umidade para o módulo de elasticidade e de 4% de alteração a cada 1% de umidade para o módulo de ruptura e tensão de cisalhamento. Nos quadros em anexo, são apresentados ainda os valores médios, desvio padrão e variância para os valores ajustados e não ajustados

Os métodos estatísticos de análise de regressão foram utilizados para estabelecer relações matemáticas entre os parâmetros NDT determinados para a madeira com os resultados obtidos nos ensaios de flexão das vigas laminadas.

A primeira etapa envolveu a análise dos resultados obtidos por viga. Em seguida, a análise envolveu os resultados obtidos pelas classes de vigas montadas com tábuas que alcançaram os valores de MOE estabelecidos na norma CEN e das madeiras que alcançaram os valores de classificação porém, não são utilizadas para construção de vigas, segundo recomendações da mesma norma e, por último, foi desenvolvida a análise envolvendo todas as classes de vigas construídas.

De início, foi procedida análise traçando-se gráficos de dispersão, para avaliar a dependência entre o módulo de elasticidade à flexão das vigas com os parâmetros NDT estabelecidos, ou seja, a média do módulo de elasticidade das camadas de madeira que compõem a própria viga, determinados em toda a extensão das tábuas, a intervalos de 90 cm, totalizando 4 pontos e determinados em apenas 2 pontos centrais de cada tábua.

A seguir foram testados modelos matemáticos, empregando-se as bases da regressão linear para relacionar as variáveis e obter o de melhor ajuste aos resultados experimentais.

4.3.1 CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS

Tendo em vista que para todas as vigas, a classe das tábuas foi definida em função do módulo de elasticidade médio, determinado em quatro pontos de cada tábua, a princípio foi verificada a correlação existente entre os valores do módulo de elasticidade da viga (E_{viga}), com a média dos valores do módulo de elasticidade médio determinado pelos quatro pontos ($E_{tábuas,4\text{ pto}}$), tendo sido alcançado um coeficiente de correlação de 0,877, revelando que existe um consistente relacionamento positivo entre os valores observados.

A seguir foi verificada a correlação existente entre os valores dos módulos de elasticidade médio determinado nos quatro pontos da tábua ($E_{tábuas,4\text{ pto}}$), com os mesmos valores médios determinados em apenas dois pontos da tábua porém, nos pontos centrais, próximos ao

da aplicação da carga na viga, no teste de flexão ($E_{\text{tábuas},2 \text{ pto}}$). Obteve-se um coeficiente de correlação de 0,981, valor da correlação muito próximo de 1, indicando portanto, uma equivalência quase perfeita entre os valores determinados. Tal fato indica que o sistema de classificação empregado pode ser simplificado, pela avaliação do módulo de elasticidade em apenas dois pontos médios das tábuas, reduzindo custos de equipamento e de mão de obra.

Para confirmar a validade do procedimento, em se adotar a determinação do módulo de elasticidade em apenas dois pontos centrais da tábua, foram procedidas análises das correlações existentes entre as médias dos valores obtidos nos quatro pontos, parâmetro NDT estabelecido para a definição das classes, com os valores médios determinados nos pontos centrais 1 e 2. Os resultados obtidos revelaram uma ótima correlação, indicando que a forma de determinação do parâmetro, pode ser equivalente. Os valores determinados foram:

- correlação entre valor médio dos 4 pontos e média do ponto central 1 = 0,947
- correlação entre valor médio dos 4 pontos e média do ponto central 2 = 0,965
- correlação entre média do ponto 1 e média do ponto 2 = 0,919

Procedeu-se também a análise da correlação existente entre os valores do módulo de elasticidade da viga (E_{viga}) e o módulo de elasticidade médio determinado em dois pontos de cada tábua ($E_{\text{tábuas},2 \text{ pto}}$). Obtido um coeficiente de correlação de 0,885. O resultado apresentou uma pequena diferença superior, com relação ao valor da correlação alcançada para a média dos quatro pontos ($R = 0,877$).

Os resultados dos parâmetros determinados em termos do coeficiente de correlação apresentaram valores próximos, comprova porém, que o módulo de elasticidade das tábuas para construção de vigas laminadas de pequenas dimensões, pode ser avaliado em apenas dois pontos médios de cada tábua, o que não apenas simplifica mas também, pode melhorar a indicação da perspectiva de resultados das vigas.

4.3.2 MODELO ESTIMADOR

Com base nas correlações entre as variáveis, foi determinado, através da análise de regressão, o modelo de equação para estimar o valor do módulo de elasticidade de uma viga (E_{viga}), em função da média dos valores do módulo de elasticidade das tábuas ($E_{\text{tábuas}}$).

Procedimento I. Análise isolada em dois grupos, das classes de tábuas admitidas para construção de vigas pela EN TC 124.203 - CEN e das classes de tábuas com valores do módulo de elasticidade de classificação inferior, abaixo dos níveis requeridos pela mesma norma, correlacionando a rigidez da viga com o módulo de elasticidade das tábuas, determinados em:

I.1) 4 pontos, em toda a extensão das tábuas ($E_{4 \text{ pontos}}$)

I.2) 2 pontos centrais de cada tábua ($E_{2 \text{ pontos médios}}$).

a) Classes de tábuas excluídas pela CEN, para construção de vigas laminadas

I.1 equação de previsão da rigidez de vigas laminadas, com a série de classes de tábuas determinados pelo $E_{4 \text{ pontos}}$:

Variável x : módulo de elasticidade das tábuas determinado em quatro pontos.

Modelo de equação:

$$E_{\text{viga}} = 36824 + 0,511.(E_{\text{tábuas, 4 pontos}}) \quad (\text{equação 4.01})$$

$R^2 = 0,792$, indicando boa adequação do modelo.

$F = 26,57^{**}$

I.2. equação de previsão da rigidez de vigas laminadas, com a série de classes de tábuas excluídas pela CEN, determinados por $E_{2 \text{ pontos médios}}$:

Variável x : módulo de elasticidade das tábuas determinado em dois pontos médios.

Modelo de equação:

$$E_{\text{viga}} = 42675 + 0,426.(E_{\text{tábuas, média 2 pontos}}) \quad (\text{equação 4.02})$$

$R^2 = 0,635$, indicando adequação aceitável do modelo adotado.

$F = 12,18^{**}$

b) Modelo de equação para vigas laminadas, com tábuas de classificação requerida pela CEN

I.1 equação de previsão da rigidez de vigas laminadas, com a série de classes de tábuas incluídas na CEN, determinados por E₄ pontos:

Variável independente x: parâmetro NDT determinado em 4 pontos, totalizando toda a extensão da tábua.

Modelo de equação:

$$E_{\text{viga}} = 53615 + 0,382 \cdot (E_{\text{tábuas}}, \text{média 4 pontos}) \quad (\text{equação 4.03})$$

$R^2 = 0,511$, indicando adequação não satisfatória do modelo.

$$F = 14,63^{**}$$

I.2 equação de previsão da resistência de vigas laminadas, com a série de classes de tábuas, incluídas pela CEN, determinados por E₂ pontos:

Variável independente x: parâmetro NDT determinado em 2 pontos médios das tábuas.

Modelo de equação:

$$E_{\text{viga}} = 46931 + 0,446 \cdot (E_{\text{tábuas}}, \text{média 2 pontos}) \quad (\text{equação 4.04})$$

$R^2 = 0,564$, indicando adequação não satisfatória do modelo.

$$F = 18,08^{**}$$

Entre as quatro análises efetuadas no Procedimento I, apenas a equação 4.01 determinada pela classe de tábuas não especificadas pela CEN, para construção de vigas laminadas, apresentou coeficiente de determinação indicando boa adequação do modelo ($R^2 = 0,792$).

A análise isolada em dois grupos, apresentou, em geral, baixos valores do coeficientes de determinação (R^2), principalmente para o grupo de vigas com tábuas de classificação requerida pela CEN, indicando uma adequação não satisfatória dos modelos. Tal fato deve ser atribuído a insuficiência de pontos observados, pela redução da quantidade de valores analisados, em função da divisão das classes de tábuas, em dois grupos.

Procedimento II. Análise envolvendo todas as classes estudadas, correlacionando a rigidez das vigas (E_{viga}), com o módulo de elasticidade das tábuas ($E_{\text{tábuas}}$) determinados em:

II.1 $E_{4 \text{ pontos}}$

II.2 $E_{2 \text{ pontos}}$

II.1) Variável independente \underline{x} : Média do módulo de elasticidade determinado em quatro pontos de cada tábua ($E_{4 \text{ pontos}}$):

O modelo estatístico adotado, foi a equação 4.05.

Modelo da Equação:

$$E_{\text{viga}} = 39265 + 0,506.(E_{\text{tábuas, média 4 ptos}}) \quad (\text{equação 4.05})$$

$R^2 = 0,769$, indicando boa adequação do modelo.

$$F = 76,54^{**}$$

O coeficiente de determinação obtido para a equação de regressão (4.05), de 0,769 é considerado válido para previsões de resistência, pela literatura, estando próximos aos valores determinados por HOYLE (1961,1962) e PELLERIN (1963b).

A equação 4.05 pode ser utilizada para o cálculo da rigidez, em termos do módulo de elasticidade das vigas laminadas da espécie em estudo, observando-se as seguintes condições:

- A madeira que irá compor as camadas das vigas laminadas deve ser de tábuas com dimensões nominais de 152,4 x 25,4 mm (6"x 1") e passarem por um processo de classificação visual para eliminação dos defeitos preponderantes.

- O valor do módulo de elasticidade das tábuas deve ser determinado a intervalos de 90 cm, em cada peça individualmente.

- De acordo com os valores do módulo de elasticidade médio de cada peça, deve ser separado em classes definidas para a resistência prevista das vigas laminadas.

- As tábuas utilizadas na composição, devem ser posicionadas na montagem das vigas, numa sequência gradual, de acordo com os valores do módulo de elasticidade, observando-se as regiões de maior solicitação.

II.b) Variável independente: média do módulo de elasticidade determinado em dois pontos,

$(E_{2 \text{ pontos}})$:

O modelo de equação adotado para estimar o módulo de elasticidade de uma viga laminada, com base na média do módulo de elasticidade, determinado em dois pontos centrais de cada tábua foi a equação 4.06:

$$E_{\text{viga}} = 34782 + 0,550.(E_{\text{tábuas, média 2 pontos}}) \quad (\text{equação 4.06})$$

$R^2 = 0,784$, indicando boa adequação do modelo, sendo melhor que o modelo anterior.

$$F = 83,26^{**}$$

O coeficiente de determinação obtido para a equação de regressão 4.06 foi de $R^2 = 0,784$, um pouco maior do que o obtido para a equação anterior 4.05, indicando melhor adequação do modelo.

De maneira análoga, a equação 4.06 pode ser utilizada para previsão da rigidez das vigas laminadas da espécie em estudo, observando-se as mesmas condições porém, com o valor do módulo de elasticidade médio das tábuas, determinado em apenas dois pontos centrais médios de cada peça individualmente.

Observa-se nos itens anteriores que o modelo matemático envolvendo apenas grupos de classes para a análise de regressão, os níveis de significância não se afiguram satisfatórios, evidenciando, possivelmente, amostra não suficientemente abrangente.

Outra observação cabível, refere-se ao fato de os valores das variáveis estarem estreitamente relacionadas, podendo admitir-se, por esta razão, que um modelo matemático mais amplo, representando a influência significativa de outras variáveis, tais como teor de umidade e massa específica, obteriam ajustes mais satisfatórios aos resultados experimentais.

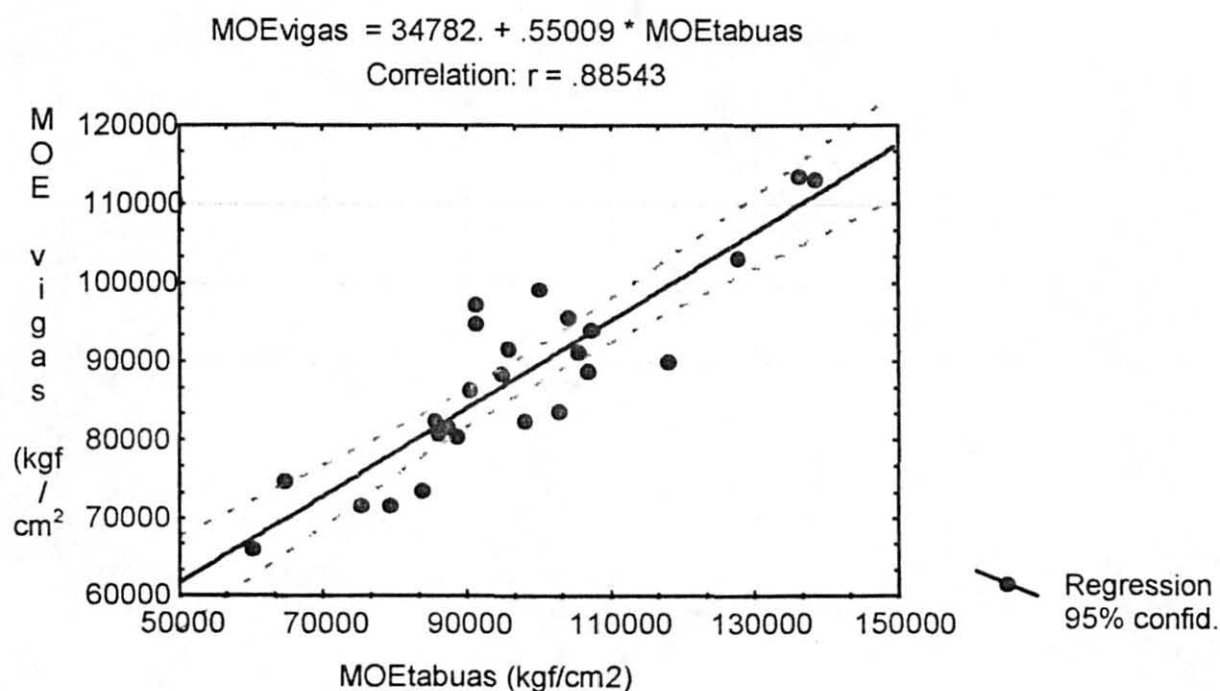
A avaliação globalizada dos resultados, para todas as vigas construídas, das diversas classes, permitem prever melhor a influência efetiva da classificação NDT, para a espécie em estudo, no módulo de elasticidade à flexão estática.

O modelo de regressão linear admitido na análise conjunta dos resultados experimentais obtidos, que permite prever a rigidez das vigas laminadas, baseados nos parâmetros NDT, estudados, foi:

$$MOE_{VIGA} = 34782 + 0,550.(MOE_{TÁBUAS, MÉDIA 2 PONTOS})$$

No gráfico da figura 19 a seguir é demonstrado o relacionamento verificado entre MOE_{viga} e $MOE_{tábuas}$, e a correspondente linha de regressão característica, utilizada para determinar a equação.

Figura 19 Gráfico demonstrativo do relacionamento entre as variáveis MOE_{VIGA} e $MOE_{TÁBUAS}$ MÉDIA 2 PONTOS, verificado através da regressão linear



Além dos resultados obtidos nos itens anteriores, foram verificados os valores dos coeficientes de determinação (R^2) e dos testes de significância (F) para as equações testadas entre as variáveis Módulo de ruptura (MOR) e Tensão de Cisalhamento (T_m) das vigas, que indica a resistência máxima ao cisalhamento e que são apresentados na tabela 13.

Tabela 13 Equações testadas e valores dos coeficientes de determinação para o módulo de ruptura e tensão de cisalhamento.

Equação	R^2	F
$E_{vigas} = a + b \cdot MOR$	0,255	*
$E_{vigas} = a + b \cdot T_m$	0,255	*

*significativo ao nível de 95% de probabilidade.

Embora o teste “F” indicasse significância relativa das equações, pelos baixos valores do coeficiente de determinação, observa-se que praticamente não houve correlação entre as variáveis testadas. As correlações entre a variável dependente módulo de elasticidade das vigas (E_{vigas}) e as variáveis independentes MOR_{vigas} e $T_{m,vigas}$, apresentaram adequação insuficiente do modelo. Fato este, que pode ser justificado pela alta variabilidade nos valores do módulo de ruptura das vigas, tendo em vista não terem sido considerados os defeitos presentes nas posições críticas e que podem ter ocasionado o início da ruptura nas vigas. Outro fator importante a ser observado, é que a utilização de um único parâmetro não é suficiente para avaliação da resistência, em função de existirem outros fatores, tais como a massa específica e inclinação de grã, que influem na resistência da madeira.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em geral, os resultados deste estudo mostraram a alta variedade das peças de madeira classificadas mecanicamente, alcançando diversas classes, dentro das condições estabelecidas pelas especificações da CEN para produção de vigas laminadas. As vigas laminadas construídas com as classes de madeira determinadas, alcançaram valores de resistência e de rigidez, próximos aos requeridos pela mesma norma. A realização prática para melhorar o nível de aproveitamento, depende da adequação do sistema de classificação visual.

A metodologia empregada, possibilitou o estudo e o desenvolvimento de modelos para estimar a rigidez de uma viga laminada, através do correlacionamento com as propriedades da madeira, determinadas na classificação.

No desenvolvimento deste estudo, foram efetuadas observações, com base nos dados experimentais e na análise estatística dos resultados obtidos, que conduzem a algumas conclusões, cujos aspectos considerados mais relevantes são apresentados.

Com base nos resultados obtidos para a classificação mecânica da madeira de *Pinus taeda*, conclui-se que:

- A metodologia adotada para a classificação mecânica da madeira permitiu uma avaliação eficiente das tábuas por rigidez, determinando classes que corresponderam à rigidez das vigas laminadas. A definição de classes com mais parâmetros, indica a possibilidade de um melhor aproveitamento da madeira e maior segurança no cálculo da resistência nas estruturas.

- Pelos resultados observados nos testes das vigas, os defeitos devido aos nós e sua posição na região tracionada da viga ou ainda muito próximos a emendas, foram os principais responsáveis pelo início da ruptura e pelo colapso da viga. Estes fatos indicam que a utilização

destes parâmetros para a classificação da madeira, da espécie em estudo, permitem uma avaliação mais eficiente da resistência da madeira para produção de vigas laminadas.

- Os valores determinados na classificação, permitiram a avaliação de uma das características do comportamento à resistência da madeira da espécie estudada, além de possibilitar um parâmetro comparativo com as classes de resistência das madeiras de pinus européias.

- As classes de maior concentração, em quantidades de tábuas, foram de níveis inferiores, sendo que a classe representada pelo parâmetro de rigidez, $E = 8000 \text{ MPa}$, reuniu maior número de tábuas.

A partir dos resultados observados na caracterização da madeira utilizada, é possível concluir que:

- Os valores médios da massa específica demonstraram compatibilidade com os valores citados na literatura e com os valores requeridos pela CEN.

- A propriedade de rigidez, em termos do módulo de elasticidade na flexão estática, mostraram ampla variação nos valores médios por classe. O valor médio geral, de todos os corpos de prova, foi de $E = 7570 \text{ MPa}$, dentro da faixa de valores previstos para a espécie estudada e utilizada para cálculo.

- A resistência, considerada em termos do módulo de ruptura, apresentou altos valores médios por classe, acima dos valores requeridos pela CEN, indicando a boa qualidade da madeira no que se refere a corpos de prova isentos de defeitos. Tal fato revela a necessidade de uma classificação visual mais acurada, com a eliminação mais criteriosa dos defeitos, notadamente do chamado “nó morto”, que confere à madeira uma queda na classe de qualidade, no que se refere à resistência. A prática de medidas silviculturais apropriadas, como

a desrama, associadas à outras técnicas de controle, poderiam minimizar o aparecimento exagerado dos nós, na madeira da espécie estudada.

- Os resultados obtidos para o módulo de ruptura em flexão estática e os valores de resistência à compressão paralela, seguiram de maneira geral, a mesma tendência apresentada pelo módulo de elasticidade e portanto, a mesma da distribuição das classes.

- Nos testes de resistência da linha de cola à tração, das emendas utilizadas nas vigas, as rupturas ocorreram na maioria por cisalhamento na madeira e, ocasionalmente, na linha adesiva. As análises das rupturas indicaram que as falhas apresentadas na colagem, foram ocasionadas pela imperfeição nos encaixes das emendas, que impediram um perfeito contato entre as áreas a serem coladas. Estes fatos comprovam a boa adesividade apresentada pela madeira, em função de sua boa permeabilidade e da qualidade do adesivo empregado.

Com base nos resultados experimentais apresentados e na análise estatística efetuada para as vigas laminadas, é possível concluir que:

- Os valores dos módulos de elasticidade das vigas variaram de acordo com as classes e com a classificação da madeira, evidenciando assim uma correspondência da propriedade de rigidez das tábuas com a rigidez das vigas.

- De maneira geral, em termos de rigidez, os valores do módulo de elasticidade obtidos apresentaram níveis próximos aos valores requeridos para as vigas laminadas produzidas com madeiras de pinus europeus, indicando grau de qualidade também próximos a estes. Os percentuais alcançados pelos resultados pode ainda ser melhorado, através do controle dos níveis de defeitos da madeira admitidos na classificação.

- Os valores de resistência obtidos com relação ao módulo de ruptura, apresentaram um percentual comparativo maior do que o módulo de elasticidade em relação a norma adotada.

- As equações de regressão desenvolvidas para estimar a rigidez das vigas laminadas com base na classificação mecânica da madeira, através do módulo de elasticidade, apresentaram bons coeficientes de correlação. Através dos coeficientes de determinação, observou-se que a equação de regressão desenvolvida com todas as classes agrupadas, apresentou melhor adequação do modelo de equação, em relação à análise efetuada por grupos de classes admitidas ou não pelas especificações da CEN.

- A variável independente da equação que permite estimar o módulo de elasticidade das vigas é facilmente obtida, pela classificação mecânica da madeira possibilitando, assim, a estimativa prévia da rigidez das vigas a serem produzidas, com base no conhecimento das propriedades de rigidez da madeira.

- As correlações entre módulo de elasticidade e módulo de ruptura não foram significativas, indicando que o critério de definição dos limites de classes adotado deve ser aprofundado, realizando-se ensaios de outras propriedades de resistência e de rigidez.

Com base nas conclusões apresentadas, recomenda-se:

- Prosseguir no estudo referente ao desenvolvimento da metodologia de classificação, adequando aos padrões internacionais, porém, de forma que seja possível a aplicação na realidade prática, na linha de produção de indústrias, pelo desenvolvimento de equações e variáveis que sejam de fácil obtenção.

- Prosseguir no estudo referente à classificação, referente à definição de classes, avaliando a influência de outras propriedades, realizando ensaios para confirmar as tendências observadas.

- Conduzir estudos que visem a utilização da madeira, como um material que possa competir no mercado da construção civil, com propriedades conhecidas e bem determinadas.

- Conduzir estudos que visem o acompanhamento dos interesses relacionados ao cálculo de peças estruturais laminadas, tais como valores característicos das propriedades e avaliação dos coeficientes relacionados aos fatores redutores de resistência das propriedades.

- Conduzir estudos desenvolvendo critérios de dimensionamento adequados a peças laminadas produzidas com madeiras de reflorestamentos, desenvolvidas em condições brasileiras.

- Prosseguir na avaliação do comportamento de peças laminadas, realizando ensaios para determinar outras propriedades de resistência de vigas laminadas homogêneas e combinadas.

- Desenvolver um modelo matemático para representar a influência de outras propriedades de resistência e de rigidez no módulo de elasticidade de peças de madeira laminada.

- Conduzir estudos para elaboração de uma norma brasileira ou Pan-americana, baseada nas especificações da norma em desenvolvimento, CEN, da comunidade econômica européia.

ANEXO 1
CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA DAS VIGAS LAMINADAS
HOMOGÊNEAS E COMBINADAS

Quadro A.1.1 Resultados dos testes de flexão das vigas homogêneas (LH) - 13 x 23 x 400 cm.
 Vigas laminadas de *Pinus taeda*, compostas de 12 tábuas de 18 mm.
 Resultados não corrigidos a 12% de umidade

IDEN- TIFICA- ÇÃO	UMI- DADE %	MODULO ELASTICID. MPa	MODULO RUPTURA MPa	TENSAO CISALHAM. MPa	CARGA MAXIMA kN	CARGA L. P.* kN
LH10-1	12,10	5121,59	19,01	0,86	34,31	17,07
LH10-2	11,50	6462,94	20,91	0,95	37,74	20,63
LH10-3	11,20	7326,28	23,96	1,08	43,24	21,45
LH15-1	11,00	5204,14	19,30	0,87	34,83	14,69
LH15-2	11,60	7226,71	21,34	0,97	38,53	17,42
LH15-3	11,50	6969,39	25,75	1,16	46,47	15,38
LH15-4	11,30	7402,54	23,26	1,05	41,99	16,53
LH20-1	11,30	7870,14	26,48	1,20	47,79	20,65
LH20-2	11,50	8086,90	25,73	1,16	46,44	21,87
LH20-3	12,00	7917,18	23,88	1,08	43,11	22,30
LH20-4	11,00	8003,84	27,01	1,22	48,75	19,86
LH20-5	11,00	6609,78	20,42	0,92	36,85	13,93
LH25-1	11,70	8090,07	22,90	1,03	41,33	14,92
LH25-2	12,20	8090,45	19,05	0,86	34,38	16,73
LH25-3	12,20	8654,09	25,25	1,14	45,58	20,48
LH28-1	12,00	8184,52	23,94	1,08	43,21	17,78
LH28-2	10,50	9224,48	32,87	1,49	59,33	25,50
LH28-3	12,80	8956,39	34,64	1,57	62,53	23,03
LH30-1	12,00	8835,51	24,39	1,10	44,03	18,58
LH30-2	11,40	9359,34	25,07	1,13	45,26	19,37
LH30-3	13,00	8705,67	24,58	1,11	44,37	18,01
LH38-1	11,00	11143,47	27,57	1,25	49,77	19,44
LH38-2	11,70	11095,67	29,97	1,35	54,09	21,68
LH38-3	11,00	10127,88	28,09	1,27	50,70	22,70

*Carga no limite proporcional e carga máxima de ruptura determinadas no teste de flexão estática.

Quadro A.1.2 Resultados dos testes de flexão das vigas combinadas (LC) - 13 x 23 x 400 cm.
 Vigas laminadas de *Pinus taeda*, compostas de 12 tábuas de 18 mm.
 Resultados não corrigidos a 12% de umidade

IDEN- TIFICA- ÇÃO	UMI- DADE %	MODULO ELASTICIDADE MPa	MODULO RUPTURA MPa	TENSÃO CISALHAM. MPa	CARGA MÁXIMA kN	CARGA L. P.* kN
LC24-1	11,50	9514,62	23,57	1,06	42,54	23,69
LC24-2	11,70	8461,39	21,42	0,97	38,66	21,31
LC24-3	11,75	9288,73	28,09	1,27	50,70	25,33
LC24-4	11,70	9736,71	31,41	1,42	56,70	27,48

*Carregamento aplicado no Limite Proporcional

Quadro A.1.3 Resultados dos testes de flexão das vigas homogêneas (LH) - 13 x 23 x 400 cm.
 Vigas laminadas de *Pinus taeda*, compostas de 12 tábuas de 18 mm.
 Valores corrigidos ao teor de umidade de 12%.

CLASSE DA MADEIRA	IDENTI- FICAÇÃO VIGA	MODULO ELASTICIDADE MPa	MODULO RUPTURA MPa	TENSÃO CISALHAMENTO MPa
C13-7E	LH10-1	5129,27	19,08	0,864
	LH10-2	6414,46	20,49	0,928
	LH10-3	7238,37	23,19	1,050
C13-7E	LH15-1	5126,07	18,53	0,839
	LH15-2	7183,34	21,00	0,951
	LH15-3	6917,13	25,23	1,142
	LH15-4	7324,81	22,61	1,024
C15-8E	LH20-1	7787,50	25,74	1,165
	LH20-2	8026,25	25,21	1,142
	LH20-3	7917,19	23,88	1,081
	LH20-4	7883,78	25,93	1,174
	LH20-5	6510,63	19,60	0,887
C18-9E	LH25-1	8053,67	22,62	1,024
	LH25-2	9017,42	19,20	0,869
	LH25-3	8680,05	25,46	1,152
C21-10E	LH28-1	8184,52	23,94	1,084
	LH28-2	9155,30	32,21	1,458
	LH28-3	9063,87	35,75	1,619
C15-11E	LH30-1	8835,51	24,39	1,104
	LH30-2	9275,11	24,47	1,108
	LH30-3	8836,26	25,57	1,181
C30-12E	LH38-1	10976,32	26,47	1,198
C30-15E	LH38-2	11045,74	29,61	1,341
	LH38-3	9975,96	26,97	1,221

Quadro A.1.4 Resultados dos testes de flexão das vigas combinadas (LC) - 13 x 23 x 400 cm.

Vigas laminadas de Pinus taeda, compostas de 12 tábuas de 18 mm.

Valores corrigidos ao teor de umidade de 12%.

CLASSE DA MADEIRA	IDENTIFICAÇÃO VIGA	MÓDULO ELASTICIDADE Mpa	MÓDULO RUPTURA MPa	TENSÃO CISALHAMENTO MPa
C15-8E	LC24-1	9443,26	23,10	1,046
+	LC24-2	8423,31	21,16	0,958
C18-9E	LC24-3	9253,90	27,81	1,259
	LC24-4	9692,90	31,03	1,405

Quadro A.1.5 Análise dos valores do Módulo de Elasticidade das vigas homogêneas

Dados não ajustados ao teor de umidade de 12%				Dados ajustados a 12% de umidade		
CLAS-SIFICAÇÃO	MÉDIA (MPa) X	DESVIO PADRÃO S	COEF. VARIAÇÃO (%)	MÉDIA (MPa) X	DESVIO PADRÃO S	COEF. VARIAÇÃO (%)
LH10	6303,60	907,08	14,39	6260,70	867,87	13,86
LH15	7199,55	177,87	2,47	7141,76	169,01	2,37
LH20	7697,57	548,94	7,13	7625,07	562,41	7,37
LH25	8578,20	371,47	4,33	8583,71	399,30	4,65
LH28	8788,46	440,85	5,02	8801,23	437,67	4,97
LH30	8966,84	282,56	3,15	8982,29	207,05	2,30
LH38	110017,20	4771,21	4,34	10666,00	488,76	4,58

Quadro A.1.6 Análise dos valores do Módulo de Elasticidade das vigas combinadas

Dados não ajustados ao teor de umidade de 12%				Dados ajustados a 12% de umidade		
CLAS-SIFICAÇÃO	MÉDIA (MPa) X	DESVIO PADRÃO S	COEF. VARIAÇÃO (%)	MÉDIA (Mpa) X	DESVIO PADRÃO S	COEF. VARIAÇÃO (%)
LC 24	9250,36	482,26	5,21	9203,34	476,50	5,17

Quadro A.1.7 Análise dos valores do Módulo de Ruptura das vigas homogêneas e combinadas

Dados não ajustados ao teor de umidade de 12%				Dados ajustados a 12% de umidade		
CLAS SIFICA- ÇÃO	MÉDIA (MPa) X	DESVIO PADRÃO S	COEF. VARIAÇÃO (%)	MÉDIA (MPa) X	DESVIO PADRÃO S	COEF. VARIAÇÃO (%)
LH 10	21,29	2,04	9,57	20,92	1,70	8,14
LH 15	23,45	1,80	7,68	22,94	1,74	7,59
LH 20	24,70	2,39	9,68	24,07	2,35	9,75
LH 25	22,40	2,56	11,42	22,43	2,56	11,41
LH 28	30,48	4,68	15,36	30,65	4,95	16,16
LH 30	24,68	0,29	1,16	24,81	0,53	2,16
LH 38	28,54	1,03	3,60	27,68	1,38	4,97
LC 24	26,12	3,89	14,89	25,78	3,88	15,06

Quadro A.1.8 Análise dos valores da Tensão de Cisalhamento das vigas homogêneas e combinadas

Dados não ajustados ao teor de umidade de 12%				Dados ajustados a 12% de umidade		
CLAS SIFICA- ÇÃO	MÉDIA (MPa) X	DESVIO PADRÃO S	COEF. VARIAÇÃO (%)	MÉDIA (MPa) X	DESVIO PADRÃO S	COEF. VARIAÇÃO (%)
LH 10	0,96	0,09	9,57	0,95	0,08	8,14
LH 15	1,06	0,08	7,68	1,04	0,08	7,59
LH 20	1,12	0,11	9,68	1,09	0,11	9,75
LH 25	1,01	0,11	11,42	1,01	0,11	11,41
LH 28	1,38	0,21	15,36	1,39	0,22	16,16
LH 30	1,12	0,01	1,16	1,13	0,03	3,11
LH 38	1,29	0,04	3,60	1,25	0,06	4,97
LC 24	1,18	0,17	14,88	1,17	0,17	15,06

ANEXO 2

ANÁLISES DE VARIÂNCIA

A.2.1 Análise de variância para o módulo de elasticidade da viga com relação a 4 pontos
Grupo de classes de vigas que não constam na CEN

Fonte de variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F
Regressão	1	$19,17597 \times 10^7$	$19,17597 \times 10^7$	26,57**
Resíduo	7	$5,05126 \times 10^7$	$7,21609 \times 10^6$	
Total	8	$24,22723 \times 10^7$		

A.2.2 Análise de variância para o módulo de elasticidade da viga com relação a 2 pontos
Grupo de classes de vigas que não constam na CEN

Fonte de variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F
Regressão	1	$15,385398 \times 10^7$	$15,385398 \times 10^7$	12,18**
Resíduo	7	$8,841837 \times 10^7$	$12,631197 \times 10^6$	
Total	8	$24,227235 \times 10^7$		

A.2.3 Análise de variância para o módulo de elasticidade da viga com relação a 4 pontos
Grupo de classes de vigas que constam na CEN

Fonte de variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F
Regressão	1	$64,616032 \times 10^7$	$64,616032 \times 10^7$	14,63**
Resíduo	14	$61,827257 \times 10^7$	$44,162328 \times 10^6$	
Total	15	$126,443289 \times 10^7$		

** - significativo a 1% de probabilidade.

A.2.4 Análise de variância para o módulo de elasticidade da viga com relação a 2 pontos
Grupo de classes de vigas que constam na CEN

Fonte de variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F
Regressão	1	$71,262400 \times 10^7$	$71,262400 \times 10^7$	18,08**
Resíduo	14	$55,180889 \times 10^7$	$39,414920 \times 10^6$	
Total	15	$126,443289 \times 10^7$		

A.2.5 Análise de Variância para o módulo de elasticidade da viga com relação aos 4 pontos:
Todas as classes de vigas estudadas

Fonte Variação F.V.	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F calculado
Tratamento	1	$26,387758 \times 10^8$	$26,387758 \times 10^8$	76,54**
Resíduo	23	$79,296780 \times 10^7$	$34,476860 \times 10^6$	
Total	24	$34,317434 \times 10^8$		

A.2.6 Análise de variância para o módulo de elasticidade da viga com relação a 2 pontos
Todas as classes de vigas estudadas

Fonte de variação	G.L.	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F
Regressão	1	$26,889282 \times 10^8$	$26,889282 \times 10^8$	83,26**
Resíduo	23	$74,281529 \times 10^7$	$3,229632 \times 10^7$	
Total	24	$34,317069752 \times 10^8$		

** - significativo a 1% de probabilidade.

ANEXO 3
VALORES DAS PROPRIEDADES DETERMINADAS PARA
CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

Valores das propriedades das tábuas de *Pinus taeda* L., utilizadas na montagem das vigas laminadas, por classe de resistência.

QUADRO A.3.1-Valores médios de propriedades de ruptura e de elasticidade à flexão estática, das tábuas de *Pinus taeda*, utilizadas na montagem das vigas laminadas, por classe da resistência.

CLASSE DE RESIST.	MÓDULO DE ELASTICIDADE MOE (MPa)	MÓDULO DE DE RUPTURA MOR (Mpa)	TENSÃO DE RUPTURA σ_{rup} (MPa)	MASSA ESPECÍFICA (kN/m ³)	NÚMERO DE CORPOS DE PROVA
C13-7E	5251	26,33	2,51	4,44	40
C13-7E	7160	31,41	2,99	4,71	11
C15-8E	8282	32,83	3,13	4,67	8
C18-9E	9188	33,24	3,17	4,79	10
C21-10E	10287	35,15	3,35	4,83	4
C15-11E	11320	39,30	3,75	5,35	5
C30-12E	12228	41,85	3,98	5,33	5
C21-13E	-	-	-	-	-
C37-14E	14205	38,48	3,67	4,96	3

QUADRO A3.2 - Valores de resistência à compressão paralela ou axial das amostras de tábuas de *Pinus taeda*, utilizada na montagem das vigas laminadas,

C.P. σ_{rup} Massa Esp.	C.P. σ_{rup} Massa Esp.	C.P. σ_{rup} Massa Esp.	C.P. σ_{rup} Massa Esp.
No. MPa kN/m ³	No. Mpa kN/m ³	No. Mpa kN/m ³	No. Mpa kN/m ³
1 29,18 4,39	24 46,85 5,67	47 27,19 4,84	70 36,89 5,18
2 37,18 5,47	25 40,63 6,06	48 41,24 6,18	71 22,25 4,26
3 29,93 5,18	26 28,80 4,40	49 29,10 4,42	72 22,88 4,16
4 35,92 5,28	27 39,54 5,70	50 29,22 5,14	73 37,19 5,38
5 33,00 5,23	28 26,05 4,22	51 26,83 4,18	74 25,63 5,36
6 38,44 5,28	29 43,15 5,87	52 25,04 3,96	75 25,83 4,06
7 26,83 4,32	30 39,23 5,30	53 31,13 5,61	76 28,08 4,33
8 31,60 4,78	31 30,35 4,93	54 31,41 4,95	77 33,47 4,85
9 35,93 5,22	32 31,91 5,15	55 29,73 5,52	78 31,41 5,42
10 37,18 5,27	33 25,84 5,02	56 35,49 5,47	79 32,99 4,78
11 27,24 4,59	34 31,54 4,57	57 26,92 5,21	80 37,65 5,27
12 25,53 4,16	35 40,47 5,42	58 28,32 5,02	81 35,33 5,82
13 36,88 5,31	36 34,87 5,09	59 38,13 5,52	82 33,91 4,68
14 34,10 5,07	37 33,53 4,81	60 38,91 5,64	83 36,69 5,03
15 39,38 5,31	38 26,47 4,06	61 26,04 3,92	84 37,35 5,07
16 26,57 5,09	39 41,25 6,02	62 27,08 5,02	85 35,95 5,50
17 33,93 5,23	40 37,51 5,50	63 28,48 5,68	86 34,67 4,64
18 35,80 5,26	41 30,37 4,48	64 26,78 4,30	87 34,72 5,19
19 35,02 5,56	42 24,16 4,25	65 41,73 5,71	88 34,08 5,15
20 39,38 5,41	43 33,13 4,87	66 28,15 3,89	89 36,42 5,37
21 41,72 6,06	44 33,26 4,96	67 33,93 5,12	
22 39,38 5,73	45 39,07 5,67	68 30,08 4,56	
23 27,46 5,00	46 21,95 4,29	69 35,16 5,23	

QUADRO A3.3 - Valores de resistência à tração nas emendas biseladas, das tábuas utilizadas na montagem das vigas laminadas.

C.P. No.	σ_{rup} MPa	UMIDADE %	C.P. No.	σ_{rup} MPa	UMIDADE %	C.P. No.	σ_{rup} MPa	UMIDADE %
01	3,62	10,76	13	4,80	11,67	25	4,78	11,18
02	4,95	11,18	14	2,64	11,76	26	5,19	10,81
03	3,67	11,72	15	2,86	10,85	27	5,00	11,35
04	4,83	10,87	16	3,02	11,02	28	5,92	11,59
05	3,92	11,38	17	0,82	11,51	29	4,23	12,45
06	4,31	11,31	18	4,12	11,92	30	3,61	11,48
07	4,32	11,31	19	4,30	11,03	31	3,05	9,72
08	2,98	11,15	20	3,44	11,30	32	4,82	11,67
09	3,03	11,47	21	3,43	11,91	33	3,43	10,81
10	3,82	11,29	22	2,18	10,44	34	2,38	10,67
11	2,49	11,67	23	4,88	10,99	35	4,90	10,83
12	4,71	10,79	24	5,10	11,21			

ANEXO 4

A 4.1 - Norma CEN - VIGAS LAMINADAS

As tabelas foram extraídas da minuta da norma CEN e reproduzidas aqui para referências, com as especificações mais relevantes. A tabela 1 é constante da EN TC 124.203 (1990a) e estabelece as propriedades requeridas do material para as classes de resistências, aplicáveis à construção de vigas laminadas. As tabelas 2 e 3 são constantes da EN TC 124.207 (1990b) e indicam as propriedades características de resistência para vigas laminadas de composições homogêneas e combinadas, respectivamente. A tabela 4 mostra a classificação das vigas laminadas produzidas com madeiras reunidas de acordo com as exigências da tabela 1.

Tabela 1 - Classes de resistência das tábuas

classes de resistência		C13-7E	C15-8E	C15-11E	C18-9E	C21-10E	C21-13E	C24-11E	C30-12E	C30-15E	C37-14E	C48-20E	C60-22E
PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA EM MPA													
FLEXÃO	$f_{m,k}$	13	15	15	18	21	21	24	30	30	37	48	60
TRAÇÃO PARALELA	$f_{L0,k}$	8	9	9	11	13	13	14	18	18	22	29	36
TRAÇÃO PERPEND.	$f_{L90,k}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7
COMPRES. PARALELA	$f_{c0,k}$	16	17	17	19	20	20	21	24	24	28	35	40
COMPRES. PERPEND.	$f_{c90,k}$	4,8	4,8	5,2	5,2	5,4	5,7	5,7	6,3	6,7	6,7	9,0	10,5
CISALHAMENTO	$f_{v,k}$	1,6	1,7	1,7	1,8	2,1	2,1	2,4	3,0	3,0	3,7	4,8	6,0
PROPRIEDADES DE RIGIDEZ EM MPA													
MOE MÉDIO PARALELO	$E_{0,médio}$	7000	8000	11000	9000	10000	13000	11000	12000	15000	14000	20000	22000
MOE MÍNIMO PARALELO	$E_{0,min}$	4900	5500	7400	6500	7000	8700	7400	8500	10300	10000	14000	15000
MOE MÉDIO PERPEND.	$E_{90,médio}$	230	270	370	300	330	430	370	400	500	450	-	-
MÓDULO DE CISALHAM.	$G_{médio}$	440	500	690	560	630	600	690	750	900	800	1250	1400
Densidade em kg / m³													
DENSIDADE	ρ_K	290	300	430	320	350	480	380	410	520	450	600	700

Tabela 2 - Propriedades da Resistência Característica para vigas laminadas homogêneas

Classe de Resistência		LH25	LH28	LH30	LH35	LH40
FLEXÃO	$f_{m,k,R}$	25	28	30	35	40
TRAÇÃO						
•paralela	$f_{t,0,k,R}$	20	23	25	28	32
•perpendicular	$f_{t,90,k,R}$	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
COMPRESSÃO						
•paralela	$f_{c,0,k,R}$	25	26	27	29	33
•perpendicular	$f_{c,90,k,R}$	5,7	5,9	6,3	6,9	7,4
CISALHAMENTO	$f_{v,k,R}$	2,7	2,9	3,1	3,5	4,0
MÓDULO DE ELASTICIDADE PARALELO						
•flexão	$E_{médio, m, R}$	10000	11000	11500	12500	13000
•axial	$E_{médio, a, R}$	10000	11000	11500	12500	13000
DENSIDADE	kg/m^3	320	350	380	410	450

Tabela 3-Propriedades Características da Resistência para vigas laminadas combinadas (Mpa)

Classe de Resistência		LC24	LC26	LC28	LC33	LC38
FLEXÃO	$f_{m,k,g}$	24	26	28	33	38
TRAÇÃO						
•paralela	$f_{t,0,k,g}$	17	19	21	24	26
•perpendicular	$f_{t,90,k,g}$	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
COMPRESSÃO						
•paralela	$f_{c,0,k,g}$	22	23	25	27	30
•perpendicular	$f_{c,90,k,g}$	5,7	5,9	6,3	6,9	7,4
CISALHAMENTO	$f_{v,k,g}$	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1
MÓDULOS DE ELASTICIDADE PARALELO						
•flexão	$E_{médio, m, g}$	9500	10500	11000	12000	13000
•axial	$E_{médio, a, g}$	8500	9500	10500	11500	12000
DENSIDADE	kg/m^3	250	300	320	350	380

Tabela 4 - Classificação das vigas laminadas produzidas com tábuas classificadas de acordo com as especificações da EN TC 124.203

Classes de resistência para vigas laminadas homogêneas	LH25	LH28	LH30	LH35	LH40
Classe de resistência requerida para as tábuas	C18-9E	C21-10E	C24-11E	C30-12E	C37-14E
Classes de resistência para vigas laminadas combinadas	LC24	LC26	LC28	LC33	LC38
Classe de resistência requerida para:					
•camadas externas	C18-9E	C21-10E	C24-11E	C30-12E	C37-14E
•camadas internas	C13-7E	C15-8E	C18-9E	C21-10E	C24-11E

A 4.2: CLASSIFICAÇÃO REQUERIDA PARA A MADEIRA

Este anexo fornece a classificação mecânica requerida pertinente às tábuas testadas neste estudo. A tabela 5 mostra os valores desta classificação, compara com os valores determinados nos testes de flexão em corpos de prova e, com os exigidos pela classificação da norma CEN, EN TC 124.203 (1990a). Como descrito no corpo principal deste estudo, 336 peças de madeira foram classificadas mecanicamente. A tabela 6 mostra os resultados desta classificação, indicando a percentagem da quantidade de tábuas deste estudo, no nível de classe alcançado.

Tabela 5 - Valores da classificação da madeira em MPa.

Classes de resistência	Classif. NDT tábuas		Testes em CP à flexão			Classificação CEN	
	$E_{0, \text{mín.}}$	$E_{\text{médio}}$	$E_{\text{médio}}$	$MOR_{\text{médio}}$	$E_{0, \text{médio}}$	$E_{0, \text{mín.}}$	Resist. caract. flexão
C13-6E	4424,27	6145,06	5250,82	26,33	7000	4900	13
C13-7E	6882,20	7389,45	7159,93	31,41	7000	4900	13
C15-8E	7863,99	8401,10	8282,60	32,83	8000	5500	15
C18-9E	8848,55	9338,98	9187,72	33,24	9000	6500	18
C21-10E	9814,91	10279,24	10287,41	35,15	10000	7000	21
C15-11E	10796,33	11188,44	11320,19	39,31	11000	7400	15
C30-12E	11795,99	12188,32	12228,54	41,85	12000	8500	30
C21-13E	12842,41	13215,55	-	-	13000	8700	21
C37-14E	13730,51	14221,34	13907,72	42,66	14000	10000	37
C30-15E	14799,78	15706,39	14800,20	30,12	15000	10300	30

Tabela 6 - Resultado da classificação mecânica das tábuas

CLASSE	Quantidade de tábuas na classe %
C13-6E	11,34
C13-7E	15,82
C15-8E	22,99
C18-9E	18,81
C21-10E	10,45
C15-11E	9,85
C30-12E	3,88
C21-13E	2,69
C37-14E	2,09
C30-15E	2,09

ANEXO 5

EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS
VIGAS EM FUNÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA DAS TÁBUAS

EQUAÇÕES TESTADAS PARA ESTIMAR O MÓDULO DE DE VIGAS LAMINADAS COLADAS (E_{VIGA})
EM FUNÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA DAS TÁBUAS ($E_{TÁBUAS}$).

$$EQUAÇÃO: y = a + bx$$

CLASSES DE TABUAS EXCLUÍDAS PELA CEN PARA CONSTRUÇÃO DE VIGAS LAMINADAS					
AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS TÁBUAS	ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS		NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA		
	a	b	F	R^2	t
$E_{TÁBUAS, 4 PTOS}$	36824	0,511	26,57	0,792	5,15
$E_{TÁBUAS, 2 PTOS}$	42675	0,426	12,18	0,635	3,49

TÁBUAS COM CLASSIFICAÇÃO REQUERIDA PELA CEN PARA CONSTRUÇÃO DE VIGAS					
AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS TÁBUAS	ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS		NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA		
	a	b	F	R^2	t
$E_{TÁBUAS, 4 PTOS}$	53615	0,382	14,63	0,511	3,83
$E_{TÁBUAS, 2 PTOS}$	46931	0,446	18,08	0,564	4,25

ANÁLISE ENVOLVENDO TODAS AS CLASSES DE TÁBUAS DETERMINADAS					
AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS TÁBUAS	ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS		NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA		
	a	b	F	R^2	t
$E_{TÁBUAS, 4 PTOS}$	39265	0,506	76,54	0,769	8,75
$E_{TÁBUAS, 2 PTOS}$	34782	0,550	83,26	0,784	9,12

ANEXO 6

BASES DO DIMENSIONAMENTO DA PRESSÃO.

Para a determinação das forças a serem aplicadas nos pontos de atuação das pressões, o dimensionamento foi realizado pelo método de SMITH (1962), o qual considera o conjunto de prensas como uma fundação contínua, suportando a viga apoiada, a qual é submetida a uma ou mais cargas concentradas ao longo de seu comprimento ou, ainda, a uma série de cargas distribuídas, todas elas aplicadas perpendiculares ao eixo da viga e da fundação.

SMITH (1962), desenvolveu fórmulas a partir da teoria da elasticidade e comparou experimentalmente os valores previstos na teoria, obtendo resultados compatíveis. Um método muito empregado, usando prensa semelhantes a bancadas de tornos mecânicos, espaçadas uniformemente ao longo da viga, deixam uma área aberta entre as prensas, que não são carregadas, assumindo necessariamente que a área super-tensionada sob a prensa, irá distribuir por si, a pressão para as áreas não carregadas. Ocorrendo ou não esta distribuição de pressão, e a extensão em que ela ocorre, deve ser determinada pelo espaçamento máximo que pode manter a carga mínima de pressão nas interfaces das áreas não tensionadas entre as prensas.

O autor considera que a distribuição da pressão ao longo das interfaces, não tem sido teoricamente aproximadas. No entanto, como a madeira é um material ortotrópico, com propriedades variando consideravelmente de ponto a ponto, uma teoria exata e matematicamente rigorosa, tornaria o problema muito complicado. Assim, a aproximação realizada pelo método empregado pelo autor, considera as tábuas das camadas externas como uma viga sendo suportada em uma fundação elástica composta de camadas internas. A teoria inclui as propriedades de resistência das tábuas, tentando prever a curva elástica deformada real da interface, a qual por sua vez deverá produzir a distribuição ao longo da interface.

Na aplicação desta teoria, deverão ser admitidas as seguintes condições:

- a) O comprimento da viga é extremamente grande se comparado à sua largura e altura;
- b) As forças de reação q atuam perpendicularmente ao eixo das vigas. As forças de atrito longitudinais desenvolvidas ao longo do contato das superfícies, serão desprezadas;
- c) Estas forças de reação q podem ser de compressão, para as deflexões positivas, ou de tração para as deflexões negativas;
- d) O material da fundação (suportes ou prensas) obedece a lei de Hooke e, é elasticamente atuante;
- e) Esta propriedade elástica da fundação pode ser expressa como uma constante K_0 , para qualquer comprimento finito da base e, será referida como "constante elástica". A constante elástica é a força necessária para defletir uma unidade de área uma unidade de distância da fundação e, expressa por: $K = (MOE_n / d_f)$.

Como o sistema de forças atuantes na viga é um sistema paralelo, as equações de equilíbrio, por si, não podem determinar os valores da reação distribuída q , pois o sistema é estaticamente indeterminado em primeiro grau. Sendo necessárias equações elásticas adicionais, foi desenvolvida uma equação da curva elástica, da porção não carregada da viga, expressa como uma equação diferencial linear homogênea de 4ª ordem, cuja solução permite obter o cálculo da pressão exercida no ponto desejado.

A resolução de equações diferenciais sucessivas levam à expressão da equação da curva elástica que pode ser determinada pelo número absoluto $\beta = \sqrt[4]{(K / 4.E.I)}$.

Utilizando a lei da superposição, onde se encontram várias camadas sob pressão, a qual diminui com a profundidade da viga, o método descrito determina a reação distribuída q , expressa como força por unidade de comprimento, através da fórmula:

$$q = \frac{w}{2 \cdot b} (2 - D\beta_m - D\beta_n) \quad \text{onde,}$$

q = pressão investigada (N/cm^2)

w = pressão a ser aplicada na travessa (N)

b = largura da viga (cm)

$D\beta_x$ = contribuição de cada carga aplicada

m, n = coordenadas dos pontos investigados (cm).

Considerando-se que a madeira utilizada para a construção das vigas laminadas tem massa específica, variando de $4,0 \text{ kN}/\text{m}^3$ a $5,2 \text{ kN}/\text{m}^3$ e conforme experiências verificadas em outros estudos, com o adesivo à base de resorcinol, a pressão mínima recomendada encontra-se entre 50 kPa e 70 kPa.

Para o dimensionamento, foi fixada uma pressão mínima de 70 kPa, para que pudesse desenvolver uma adequada adesão nas linhas de cola e uma pressão máxima de 150 kPa, resistência de cálculo, à compressão normal, do *Pinus spp.*

As dimensões adotadas para os elementos de distribuição de pressão foram:

- Travessas de peroba com $10 \times 6 \times 30 \text{ cm}$;
- 2 tábuas de distribuição de peroba com 6 cm de espessura e 450 cm de comprimento.

O espaçamento entre as prensas foi de 40 cm.

Para determinar a pressão a ser exercida sobre a viga laminada, foi calculada a força P , a ser aplicada nas travessas, de forma que a pressão produzida por esta força não fosse inferior à mínima estabelecida e nem superior à resistência a compressão normal das fibras.

Dados e parâmetros adotados para cálculo, conforme recomendações do método utilizado:

Valor médio do MOE_p à compressão paralela: 9000 MPa

Valor médio do MOE_n à compressão normal : $6,5\% \text{ MOE}_p = 585 \text{ MPa}$

Dimensões da viga de madeira laminada de *Pinus taeda*:

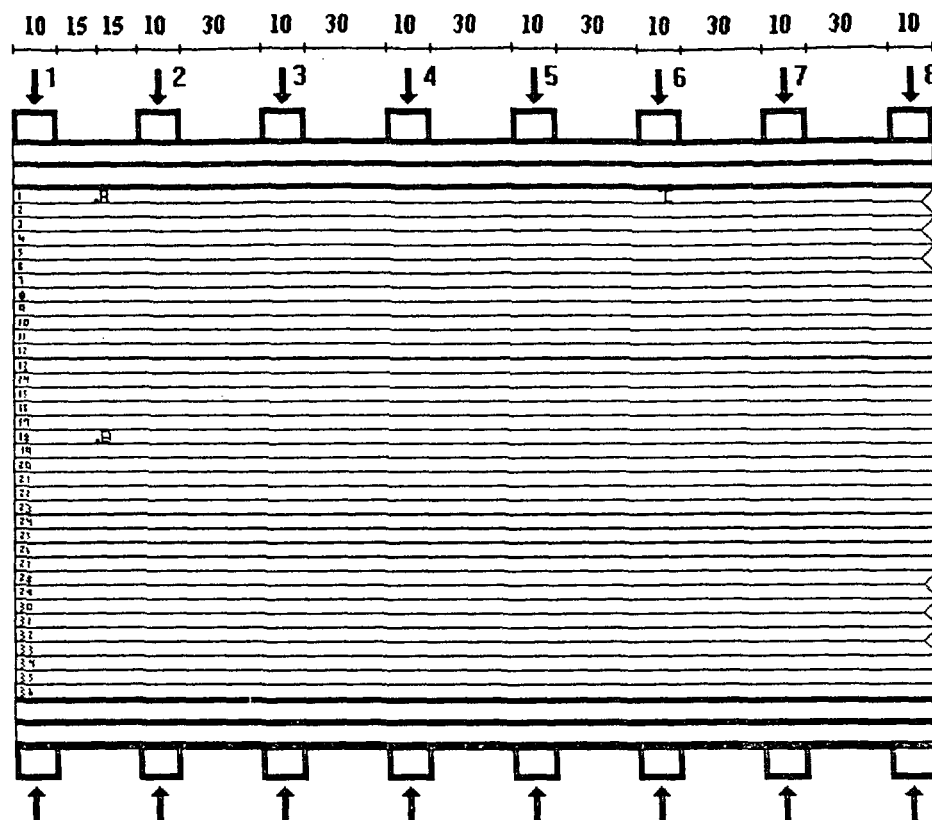
Comprimento: 400 cm

largura : 13 cm

altura : 23 cm

espessura das tábuas: 1,8 cm

O esquema de aplicação da carga é apresentado na figura a seguir:



Representação esquemática da aplicação de carga na prensa com vigas.

Sendo considerados mais críticos durante o período de prensagem, os pontos que se encontram na linha central, normal ao eixo da viga, no intervalo entre duas prensas, (ponto B), as linhas adesivas da 1a. e 2a. camada (ponto A), e ainda um outro ponto, situado exatamente sob a prensa, (ponto C). Foram efetuados cálculos das pressões nesses pontos. As coordenadas destes pontos são esquematizadas na figura acima.

A.4.1 Determinação das Pressões nos Pontos A, B e C.

•Ponto A: Altura da fundação: $d_f = 63 \text{ cm} = 0,63 \text{ m}$

Altura das tábuas de distribuição: $d = 12 \text{ cm}$

Cálculo da constante elástica expressa por: $K = \left(\frac{MOE_n}{d_f} \right) \cdot b$

$$K = (585 \div 0,63) \cdot 0,13 = 120,71 \text{ Mpa}$$

A equação diferencial da elástica é expressa por: $\beta = \frac{4}{\sqrt{4 \cdot MOE_p \cdot I}} \cdot K$

sendo I, o momento de inércia dado por: $I = \frac{b \cdot d^3}{12} = \frac{13 \cdot (12+1,8)^3}{12} = 2847 \text{ cm}^4$

e a equação diferencial fica: $\beta = \frac{4 / \sqrt{120,71}}{\sqrt{4.9000.2847}} = 0,032943 \text{ (1/cm)}$

•ponto B : Altura da fundação $d_f = 32,4 \text{ cm} = 0,324\text{m}$; $K = 234,72 \text{ MPa}$
 $d = 44,4 \text{ cm}$ $I = 94822 \text{ cm}^4$

$$\beta = \frac{4 / \sqrt{234,72}}{\sqrt{4.9000.94822}} = 0,0161933$$

Determinação dos valores de $D\beta x$, na tabela 4.6.1, os quais representam a contribuição de cada carga, nos pontos A e B.

Tabela. A.4.1 Valores da pressão aplicada nos pontos A e B, na execução da prensagem das vigas laminadas.

prensa no.	coorde- nadas x (cm)	Ponto A			Ponto B		
		$\beta \cdot x$	$e^{-\beta x} \cdot (\cos \beta x)$	$D\beta x$	$\beta \cdot x$	$e^{-\beta x} \cdot \cos \beta x$	$D\beta x$
01	m1 = 15	0,49414	0,53711		0,24290	0,761325	
	n1 = 25	0,82357	0,29825	0,23886	0,40483	0,613169	0,148156
02	m2 = 15	0,49414	0,53711		0,24290	0,761325	
	n2 = 25	0,82357	0,29825	0,23886	0,40483	0,613169	0,148156
03	m3 = 55	1,81186	-0,03899		0,89063	0,258108	
	n3 = 65	2,14129	-0,0346	0,02447	1,05256	0,172898	0,085210
04	m4 = 95	3,12958	-0,04373		1,53836	0,006964	
	n4 = 105	3,45901	-0,02989	-0,01384	1,70029	-0,02358	0,030544
05	m5 = 135	4,44730	-0,00307		2,18609	-0,06485	
	n5 = 145	4,77673	0,00054	-0,00361	2,34803	-0,06701	0,002160
06	m6 = 175	5,76502	0,00272		2,83383	-0,05602	
	n6 = 185	6,09445	0,00221	0,00051	2,99576	-0,04947	-0,00655
07	m7 = 215	7,08274	0,00058		3,48156	-0,02899	
	n7 = 225	7,41217	0,00026	0,00032	3,64349	-0,02293	-0,00606
08	m8 = 255	8,40046	-0,00012		4,12929	-0,00886	
	n8 = 265	8,72989	-0,00012	0	4,29122	-0,00560	-0,00326
09	m9 = 295	9,71818	-0,00006		4,77702	0,000544	
	n9 = 305	10,0476	-0,00003	-0,00003	4,93896	0,001609	-0,001065
10	m10 = 315	10,3770	-0,00002		5,10089	0,002307	
	n10 = 325	10,7065	0	-0,00002	5,26282	0,002710	-0,000403
				Σ 0,48552	Σ 0,396889		

•Força de pressão a ser aplicada com relação ao ponto A, determinada pela expressão:

$$q = \frac{w}{2 \cdot b} \cdot [\Sigma (D\beta_m - D\beta_n)] = \frac{w}{2 \cdot 13} \cdot (0,48552)$$

Impondo-se uma pressão mínima de $q = 70 \text{ kPa}$ (7 kgf/cm^2), tem-se:

$$w = \frac{(2 \times 0,13) \times 70}{0,48552} = \frac{18,20}{0,48552} = 37,48 \text{ kN/m}$$

A força a ser aplicada na travessa de 0,10 m, deverá ser de:

$$w = \frac{P}{0,10} \quad \therefore P = 37,48 \times 0,10 \Rightarrow P \geq 3,75 \text{ kN}$$

•pressões no ponto B:

Realizando os mesmos cálculos, análogos ao efetuados para o ponto B, obtém-se o valor da força a ser aplicada:

$$w = \frac{(2 \times 0,13) \times 70}{0,396889} = 45,86 \text{ kN/m}$$

$$P \geq 45,86 \times 0,10 \Rightarrow P \geq 4,59 \text{ kN}$$

•pressões no ponto C:

Determinando-se da mesma forma, os valores de contribuição de cada prensa, a força de pressão a ser aplicada em relação ao ponto C, são calculados pela expressão:

$$q = \frac{w}{2 \times b} (2 - D\beta_{m_6} - D\beta_{n_6}) + \Sigma(D\beta_m - D\beta_n)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Cálculo do valor de } \beta \text{ para o ponto C: } d_f = 64,8 \text{ cm} & I = 1872 \text{ cm}^4 \\ & K = 117,36 \text{ MPa} \quad \beta = 0,036327 \end{array}$$

Tabela A.4.2 -Valores de contribuição de cada prensa na força de pressão exercida no ponto C

Prensa n°.	coordenadas x (cm)	$e^{-\beta x} (\cos \beta x)$		
		$\beta \cdot x$	$D\beta x$	$D\beta m - D\beta n$
05	m5 = 05	0,18163	0,820192	
	n5 = 05	0,18163	0,820192	
04	m4 = 35	1,27144	0,082699	
	n4 = 45	1,63471	- 0,012455	0,095154
06	m6 = 35	1,27144	0,082699	
	n6 = 45	1,63471	- 0,012455	0,095154
03	m3 = 75	2,72452	- 0,059956	
	n3 = 85	3,08778	- 0,045537	- 0,014419
07	m7 = 75	2,72452	- 0,059956	
	n7 = 85	3,08778	- 0,045537	- 0,014419
02	m2 = 115	4,17759	- 0,007816	
	n2 = 125	4,54086	- 0,001820	- 0,005996
08	m8 = 115	4,17759	- 0,007816	
	n8 = 125	4,54086	- 0,001820	- 0,005996
01	m1 = 155	5,63066	0,002849	
	n1 = 165	5,99393	0,002390	0,000459
09	m9 = 155	5,63066	0,002849	
	n9 = 165	5,99393	0,002390	0,000459
Σ			0,150396	

$$q = \frac{w}{2 \times 0,13} \cdot [2 - 0,820192 - 0,820192 + (0,150396)] = \frac{w}{0,26} \cdot 0,510012$$

Impondo-se uma pressão máxima de $q = 150 \text{ kPa}$, resistência de cálculo à compressão normal do *Pinus spp.*, tem-se:

$$w = \frac{0,26 \times 150}{0,510012} = 76,47 \text{ kN/m}$$

$$P \leq 76,47 \times 0,10 \Rightarrow P \leq 7,65 \text{ kN}$$

Concluindo-se assim, que a força de pressão a ser aplicada encontrava-se no intervalo de 3,75 kN a 7,65 kN. Foi adotado o valor da pressão de 4,0 kN.

ANEXO 6

FATORES DE CONVERSÃO

Área

<u>Para converter de</u>	<u>para</u>	<u>Multiplicar por</u>
pé ²	metro ²	$9,29030 \times 10^{-02}$
polegada ²	metro ²	$6,4516 \times 10^{-04}$

Comprimento

pé	metro	$3,048 \times 10^{-01}$
polegada	metro	$2,54 \times 10^{-02}$

Força

poundal	newton	$1,38254 \times 10^{-01}$
quilograma-força	newton	$9,80665 \times 10^{00}$

Massa

grama	quilograma	$1,00 \times 10^{-03}$
-------------	------------------	------------------------

Massa Específica

grama/centímetro ³	quilograma/metro ³	$1,00 \times 10^{+03}$
-------------------------------------	-------------------------------------	------------------------

Pressão

libra-força/polegada. (psi)	newton/metro ²	$6,89475 \times 10^{-03}$
pascal	newton/metro ²	$1,00 \times 10^{00}$
quilograma-força/centímetro ²	newton/metro ²	$9,80665 \times 10^{-04}$
quilograma-força/metro ²	newton/metro ²	$9,80665 \times 10^{00}$

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **Standard Specification for structural glued-laminated timber**. 117-71. New York. Wiley. 1971. 14 p.
- 2 -----Appendix A: **Grading Requirements** for AITC 301-E26, 301-E22, 301-E20 and 301-E16 - Appendix B: **Laminator's quality control**. AITC 120-71. New York. Wiley 1971. 4p.
- 3 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL-ASTM. **Static Tests of Timbers in Structural Sizes**. ASTM D 198-67. In: Annual book of ASTM Standards. Philadelphia. USA. (part 16). 1967.
- 4 APLIN, E.N. Stiffness-Graded Eastern Spruce Laminated beams. **Forest Products Journal**. Madison, Wisconsin, v. 22, n. 01, p. 26-31, 1972
- 5 APLIN, E.N. et al. The influence of moisture content on the flexural properties of Douglas-fir dimension lumber. **Research Paper**. FPL. USDA. Forest Service. Madison, Wisconsin n. 475, 32 p. May, 1986
- 6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cálculo e execução de estruturas de madeira**. NB 11. Rio de Janeiro, 1951.
- 7 ----- **Cálculo e execução de estruturas de madeira**. NBR 7190. 22 p. Rio de Janeiro, 1982.
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE MADEIRAS - **Catálogo de Normas de Madeira Serrada de Pinus**. 32 p. Curitiba, 1993.
- 9 ATHERTON, G.H. Preliminary study of proportional limit as a predictor of ultimate strength in bending. **Forest Products Journal**. Madison. Wisconsin, v. 30, n. 11, p. 47-53. 1980
- 10 AZEVEDO, A.G.; CAMPOS, P.H.B. **Estatística básica**. 5. ed. São Paulo. Livro Técnico, 1987. 280 p.
- 11 BARKER, A. C. Clasificación estructural de madera aserrada de pino radiata destinada a madera laminada encolada estructural. **Ciencia e Investigacion Forestal**. Chile. v. 2, n. 7, p. 65-77, 1989
- 12 BARTZ, A. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO. (2: 1973: Curitiba). **Anais**. Curitiba: FIEP, 1974 p. 275-277
- 13 BENDTSEN, B. A. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **Forest Products Journal**, Madison. v. 28, n. 10, p. 61-72. 1978.
- 14 BENDTSEN, B.A.; ETHINGTON, R.L.; GALLIGAN, W. L. Properties of major Southern pines. part II. Structural properties and specific gravity. **Research Paper**. FPL USDA. Forest Service, Madison. Wisconsin, n.177, p. 59-76, 1975
- 15 BENDSTEN, A. & GALLIGAN, W. Deriving Allowable Properties of lumber. (A practical guide for interpretation of ASTM standards). USDA-FS-FPL. **General Tech. Report**. FPL. USDA. Forest Service, Madison,. n. 20, 29 p. 1978.
- 16 BEER, F.P.; JOHNSTON Jr., E. R. -**Vector Mechanics for Engineers-Statics Manual**. 3a. ed. New York. McGraw-Hill, 1977.
- 17 BIBLIS, E. J. Design consideration for laminated wood beams composed of two species. **Forest Products Journal**, Madison. Wisconsin, v. 16, n. 7, p. 39-51, 1966.
- 18 BIBLIS E. J. (1967). Strength weight ratios of two species wood beams. **Forest Products Journal**, Madison, Wisconsin, v. 17, n. 08, p. 57-59, 1967.
- 19 BOHANNAN, B. Flexural behavior of large glued-laminated beams. **Research Paper**. FPL. USDA. Forest Service, Madison. Wisconsin, n. 72, p. 1-16, 1966.

- 20 BOHANNAN, B.; MOODY, R. C. Large glued-laminated timber beams with two grades of tension laminations. **Research paper**. FPL. USDA. Forest Service, Madison. n. 113. p. 1-45, 1969.
- 21 BOHANNAN, B.; MOODY, R. C. Evolution of glulam strength criteria. **Forest Products Journal**. Madison. Wisconsin, v. 23, n. 6, p. 19-24, Jun. 1973
- 22 BORTOLETTO, JR. G. **Indicações para a utilização da madeira de seis espécies e variedades de pinus na construção civil**. São Carlos, 1993. Dissertação (Mestrado em Tecnologia do Ambiente Construído). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 23 BRASON, L. K. **Engineering Mechanics. Statics and dynamics**. Montana College of Mineral Science and Technology. Simon & Schuster, Inc. 1970.
- 24 BRITISH STANDARD CODE OF PRATICE. **The strutural use of timber**. Section two. Timber: British Standard Institute (BS 5268).
- 25 BROTERO, F. A. **Taxas de Trabalho Admissíveis em estruturas de pinho brasileiro**. Boletim. IPT, Rio de Janeiro, n. 39. p. 1-33, mar. 1951
- 26 BROWN, H. P.; PANSIN, A. J.; FORSAITH, C. C. **Textbook of wood technology**. II. New York.; McGraw Hill. 783 p. 1952.
- 27 BURDIZIK, W. M. G. e RENSBURGB. W. J. The effect of finger-joint dispersion on the strength of laminated beams. **South Afrikan Forestry Journal**, Pretoria, n. 141, p. 63-67 June, 1987.
- 28 CALLIA, V. W. **A madeira laminada e colada de pinho do Paraná nas estruturas**. Boletim IPT. São Paulo, n. 47, p. 1-58, 1958.
- 29 ----- **Madeira Laminada e colada de pinho do Paraná, seu emprego nas estruturas**. USP. Publicação n. 1 da cadeira n. 13. São Paulo, 1961.
- 30 CHUGG, W. A. **Glulam: the theory and pratice of the manufacture of glued-laminated timber structures**. London. Ernest Benn. 423 p. 1964.
- 31 COMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. **Eurocode no. 5. Common Unified rules for timber structures**. Luxembourg. ECSC-EEA-EAEC. 136p.
- 32 COSTA, E. V. **Curso de Resistência dos Materiais**. São Paulo: Ed. Nacional. 252p. 1979. v. 1 e 2.
- 33 COWN, D. J. Wood Density of radiate pine: its variation and manipulation. **New Zealand. Journal Forest**, n. 19; p. 84-92, 1974.
- 34 CURRY, W. T. Grade Stresses for Structural laminated Timber. **Special Report**. Forest Products Research. London, n. 15, p. 1-30, Jan. 1967.
- 35 ----- **Grade Stresses for Structural Laminated Timber**. In: The Strength Properties of Timber. MTP Construction, p. 141-176. England -1974.
- 36 DADSWELL, H. E.; NICHOLS, J. W. P. Assessment of wood qualities for tree breeding. I Pinus elliottii var elliottii from Queensland. Div. For. Prod. Tech. Pap. Prod. Aust. v. 4, 16 p. apud **Forestry Abstracts**, v. 21, n. 2. 1960.
- 37 DIBUZ, J. J. Shear resistance of partially glued laminate beams. **Forest Products Journal**. Madison, Wisc. v. 20, n. 8, p. 17-24. 1970.
- 38 DIVISION OF FOREST PRODUCTS - CSIRO. Gluing techniques for timber engineering structures. **Forest Products Technical Notes**. n. 1. p. 1-25. July. 1967.
- 39 DUFFIELD, J. W. Genetic improvement of wood quality. **Forest Products Journal**, Madison, Wisconsin, v. 11, n. 5, p. 211-213, 1961
- 40 EBY, R. E. Proof loading of finger-jointing for glulam timber. **Forest Products Journal**. Madison, Wisconsin, v. 31, n. 1, p. 37-41, Jan. 1981.

- 41 ETHINGTON, R.L. **Stiffness and bending strength of beams laminated from two species of wood.** IOWA, 1960. Thesis (Master Science). Report n. 2156. p.1-50. Madison, in cooperation with the University of Wisconsin.
- 42 FALK, R.H., SOLLI H. K. e AASHEIM, E. The performance of glued laminated beams manufactured from machine stress graded norwegian spruce. **The Norwegian Institute of Wood Technology**, p. 1-60, Oslo. Sept. 1992.
- 43 FALK, R.H. Testing and evaluation of Norwegian glulam.. Correspondência, File code 1550. USDA.FS.FPL. Nov. 14, 1994.
- 44 FOSCHI, R.O.; BARRET, J.D. Glued laminated beams strength: a model. **Journal of Structural Division.** American Society of Civil Engineers. New Orleans, v. 106, n. 08, p. 1735-1754. Aug. 1980
- 45 FOX, S.P. (1978). Development and tests of 26f- E Hem fir Glulam beams. **Forest Products Journal**, Madison.Wisc., v. 28, n. 6, p. 48-55. Jun.1978
- 46 FOREST PRODUCTS LABORATORY. Selection and properties of woodworking glues. **Research Note.** FPL USDA. Forest Service, Madison. Wisc., n. 138, p. 1-10, Oct. 1968.
- 47 ----- Wood handbook: wood as an engineering material. **Agric. Handbook**, Washington, n. 72, p. 1-1 - M-1, 1987.
- 48 FREAS, A. D. e SELBO, M. L. Fabrication and design principles of glued laminated wood structural members. **Technical bulletin** FPL USDA. Forest Service, Washington, n. 1069. p. 1- 220, Feb.1954.
- 49 FURIATI, M. **Classificação de peças estruturais de madeira.** São Carlos, Set. 1981. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 50 GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKI, I. P. **Secagem racional da madeira.** São Paulo: Nobel. 111 p. 1985.
- 51 GERHARDS, C.C. Dependence of MOE on strength ratio and specific gravity: 4 inch thick southern pine. **Forest Products Journal**, Madison, v. 20, n. 6, p. 37-38, Jun. 1970.
- 52 GERHARDS, C. C.; LINK, C. L. Effect of loading rate on bending strength of Douglas-fir 2 by 4's. **Forest Products Journal**, Madison, Wisc., v. 36, n. 02, p. 63-66, 1986.
- 53 GREEN, D.W.; EVANS, J. W.; PELLERIN, R. Moisture content and the flexural properties of lumber: species differences. In: International Timber Engineering Conference (1991: London) **Proceeding.** Washington: U.S. Government, 1991. vol. 2, p. 2181-2188.
- 54 GURFINKEL, G. Wood engineering. New Orleans: **Southern Forest Products Association**, 1973..573 p.
- 55 HEARMON, R.F.S. The elasticity of wood and plywood . **Special Report.** Forest Products Research. London, n. 7, p. 5- 44. 1948.
- 56 HELLMEISTER, J.C. **Sobre a determinação das características físicas da madeira.** USP. EESC. Dep. de Estruturas. Lab. de Madeira e Estrut. de Madeira. São Carlos,1982.
- 57 HELLMEISTER, J.C. **Madeira: determinação de suas características.** USP-EESC. Dep. de Estruturas. São Carlos, 1987.
- 58 HENDRICKSON, E. M.; ELLINGWOOD, B.; MURPHY, J. Limit state probabilities for structural members. **Journal of Structural Engineering.** American Society of Civil Engineers. New Orleans, v. 113, n. 01, p. 88-106. Jan. 1987.
- 59 HERNANDEZ, R. e MOODY, R. Improved performance of southern pine structural glued-laminated timber. **Research Paper** FPL. USDA. Forest Service, Madison, n. 514, p. 1-22, Oct. 1992.

- 60 HIMMELFARB, D. Testing of alberta spruce and pine laminated beams: summary report. Canadian Forestry Service. **Forest Resource Development Agreement**. 27 p. Edmonton. Alberta, 1986.
- 61 HILBRAND, H. C.; MILLER, D.G. Machine grading - theory and practice. **Forest Products Journal**. Madison, Wisconsin, v. 16, n. 11, p. 28-34, 1966
- 62 HOEL, P.G. **Estatística elementar**. Rio de Janeiro: J. Wiley, 1961. 311 p.
- 63 HOYLE, JR., R. J. A nondestructive test for stiffness. **Forest products Journal**, Madison, v. 1, n. 6, p. 251-254, 1961.
- 64 ----- Background to machine stress grading. **Forest Product Journal** Madison v. 18; n. 04; p. 87-97, 1968.
- 65 ----- Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. **Wood and Fiber Science**, Thessaloniki, v. 5, n. 1, p. 41-49, 1973.
- 66 INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO SA. **Resultados dos ensaios físicos e macânicos**. in: Métodos de ensaios adotados no IPT para o estudo de madeiras nacionais. boletim 31. 2a. ed. São Paulo.
- 67 IWAKIRI, S. **Classificação de madeiras tropicais através do método mecânico não destrutivo**. Curitiba, 1982. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná
- 68 JOHNSON, J.W. Efficient fabrication of glued-laminated timbers. **Journal of the Structural Division**. American Society of Civil Engineers. New Orleans, v. 99, n. 03, p. 431-442, Mar. 1973.
- 69 JOHNSON, J.W. Selection of low strength pieces by non destrutive testing: Douglas -fir and Hem-fir 2 x 4's in flexure. **Forest Products Journal**, Madison, v. 27, n. 08, p. 53-56, 1977.
- 70 JOKERST, R.W. Finger-jointed wood products. **Research paper**. FPL.USDA. Forest Service, Madison, Wisc., n. 382, p. 1-25, Apr. 1981.
- 71 KEENAN, F.J. Shear strength of wood beams. **Forest Products Journal**, Madison, Wisc., v. 24, n. 9, p. 63-70, 1974
- 72 KLOCK, U. **Qualidade de Madeira de Pinus Oocarpa Shiede e Pinus caribaea Morelet var hondurensis Barr e Golf**. Curitiba, 1989. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- 73 KLOOT, H e LEICESTER, R.H. Proof testing as a Grading Technique for Structural timber. In: FOREST PRODUCTS RESEARCH CONFERENCE, (18: 1977 Highett). **Contributed Papers**. 11 p., 1977.
- 74 KOCH, P. Strength of beams with laminae located according to Stiffness. **Forest Products Journal**, Madison, Wisc. v. 15, n. 10, p. 456-460, 1964.
- 75 ----- Utilization of the Southern Pines. **Agriculture Handbook**. n. 420. 1972.
- 76 KOCH, P.; BOHANNAN, B. Beam strenght as affected by placement of laminae. **Forest Products Journal**, Madison, Wisc., v. 15, n. 07, p. 289-296, 1965.
- 77 KOLLMANN, F.F.P.; COTE JR., W.A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer Verlag, 1968. 2 v.
- 78 KOLLMANN, F. **Tecnología de la madera y sus aplicaciones**. Madrid: Instituto Forestal de Investigaciones Y Experiências y el Servicio de la Madera, 1959. 675 p.,
- 79 KRAMER, P. R. Correlation of bending strenght and stiffness of southern pine. **Forest Products Journal**, Madison, v. 14, n. 10, p. 495-496, 1964.
- 80 LABORATÓRIO DE MADEIRAS E DE ESTRUTURAS DE MADEIRA (1988). **Madeira: Determinação de suas características**. 48 p. LaMEM-EESC-USP. São Carlos, 1988.

- 81 LAHR, F.A.R. **Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira.** São Carlos, 1983. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 82 LEICESTER, R.H. The future of grading structural timber. In: IUFRO WORLD CONGRESS (17: 1981: Japan). Japan, 198. Division 5. p. 35-46.
- 83 LEITNER, R.J. **As ligações em estrutura de madeira, em especial as ligações pregadas de peças estruturais de madeira de pinho.** Curitiba, 1952. Tese (Professor titular) Escola de Engenharia da Universidade Federal do Paraná.
- 84 LISBOA, C.D.J.; MATOS, J.L. M.; MELO, J. E. **Amostragem e propriedades físico-mecânicas de madeiras amazônicas.** Brasília: IBAMA., 1993. 107 p..
- 85 LITTLEFORD, T. W. Knot frequency study of laminating grades for western hemlock. **Publication Canada Department of Forest, Canadá**, n. 1009. 1963.
- 86 LUXFORD, R.F.; KRONE, R. H. End joints of various types in Douglas-fir and with Oak 13 p. USDA.FS.FPL. Madison. Wisc., Jan. 1964.
- 87 MADSEN, B. Reseach on design of structural glued-laminated material. **Forest Products Journal**. Madison, Wisc., v. 12, n. 10, p. 497-502, 1962.
- 88 ----- In-grade testing - problem analysis. **Forest Products Journal**. Madison, Wisc., v. 28, n. 04, p. 42-50. 1978.
- 89 MANBECK, H. B. et al. Performance of red maple glulam timber beams. **Research Paper FPL. USDA. Forest Service. Madison. Wisc.**, n. 519. May. 1993.
- 90 MANTILLA C., E. V. **Ligações estruturais de madeira pos adesivos.** São Carlos, 1984. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 91 ----- **Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada (MLC).** São Carlos, 1989. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo.
- 92 MARX, C. M.; MOODY, R. C. Bending strength of shalow glued-laminated beams of a uniform grade. **Research Paper. FPL. USDA. Forest Service, Madison**, n. 380, p. 1-32. Feb. 1981.
- 93 ----- Strength and stiffness of small glued-laminated beams with different Qualities of tension laminations. **Research Paper. FPL USDA. Forest Service, Madison, Wisc.**, n. 381, p.1-50, May. 1981.
- 94 ----- Effect of lumber width and tension lamination quality on the bending strength of fou-ply laminated beams. **Forest Products Journal**. Madison, Wisc., v. 32, n. 01, p. 45-51, Jan. 1982.
- 95 MARX, C.M.; EVANS, J.W. Tensile strength of AITC 302-214 grade tension laminations **Forest Products Journal**, Madison, Wisc., v. 36, n. 10, p. 13-19. Jan. 1986.
- 96 MASCIA, N.T. **Contribuição ao estudo da flexão estática em peças de madeira.** São Carlos, 1985. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo.
- 97 McLAIN, T.E. et al. The influence of moisture content on the flexural properties of southern pine dimension lumber. **Research Paper. FPL. USDA. Forest Service. Madison, Wisc.**, n. 447. 40 p. Oct., 1984
- 98 MELO, J.E.; LISBOA C.D. J. **Classificação mecânica de peças estruturais de madeira.** Série Técnica, LPF. IBAMA. Brasília, n. 4, p. 1-19. 1989.
- 99 MOODY, R. C. Tensile strength of finger joints in pith-associated and non-pith-associated southern pine 2 PY 6"S. **Research paper. FPL. USDA. Forest Service, Madison. Wisc.**, n. 138, 22p. Apr. 1970.

- 100 -----Tensile strength of lumber laminated from 1/8-inch-thick veneer. **Research paper**, FPL. USDA. Forest Service, Madison, Wisconsin, n. 181, p.1-22.
- 101 ----- Flexural strength of glued-laminated timber containing coarse-grain southern pine lumber. **Research Paper**, FPL. USDA. Forest Service, Madison. Wisc., n. 222. p.1-39 p. 1974.
- 102 ----- Design criteria for large structural glued-laminated timber beams using mixed species of visually graded lumber. **Research Paper**. FPL USDA. Forest Service. Madison, Wisc., n. 236. p. 1-39. 1974.
- 103 ----- Improved utilization of lumber in glued laminated beams. **Research Paper**, FPL. USDA. Forest Service, Madison, Wisconsin, n. 292, p.1-49.
- 104 ----- Compressive Strength of one and two-ply laminated timbers. **Forest Products Journal**. Madison, Wisc., v. 31, n. 05, p. 47-50, 1981.
- 105 MOODY, R.C.; BOHANNAN, B. Flexural properties of glued laminated Southern Pine beams with laminations positioned by visual stiffness criteria. **Research Paper**, FPL. USDA. Forest Service, Madison, Wisc., n. 127. p.1-20 p., 1970.
- 106 ----- Flexural properties of glued-laminated Southern Pine beams - finger joint and specific gravity effects. **Research Paper**, FPL. USDA. Forest Service, Madison, Wisc., n. 151, p.1-36, Jan. 1971.
- 107 MOODY, R. C.; DE SOUSA, P. P.; LITTLE, J. K. Variation in stiffness of horizontally laminated glulam timber beams. **Forest Products Journal**, Madison, Wisconsin, v. 38, n. 10, p. 39-45, Oct.1988.
- 108 MOODY, R. C.; FALK, R. Strength of glulam beams-volume effects. In: INTERNATIONAL TIMBER ENGINEERING CONFERENCE. (1990: Tokyo). **Proceedings**. Tokyo: Sugiyama Hideo ed., 1990. v. 1, p. 176-182.
- 109 MOODY, R.C. et al. Yellow poplar glulam timber beam performance. **Research Paper**, FPL. USDA. Forest Service, Madison, Wisc., n. 520. p. 1-28, June, 1993.
- 110 MORESCHI, J. C. **Levantamento da qualidade da madeira com plantações artificiais de Pinus elliotti nos estados do sul do Brasil**. Curitiba, 1976. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- 111 MUÑIZ, G.I. B. **Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de Pinus elliottii Engelm e Pinus taeda L.** Curitiba, 1993. Tese (Doutoramento em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- 112 NASH, W. A. **Resistência dos materiais**. 2 ed. São Paulo: McGraw Hill, 1982. 520 p.
- 113 OROSZ, I. Some non destructive parameters for prediction of strength of structural lumber. **Research Paper**, FPL USDA. Forest Service, Madison, Wisc., n. 100, 7 p. Oct., 1968.
- 114 PARKER, H. **Simplified design of structural timber**. New York: John Wiley. 1963. 265 p.
- 115 PASSIALIS, C. A new method for determination of glue joint shear-strength in laminated wood. **Wood and Fiber Science**, Thessaloniki, Greece, v. 18, n. 4, p. 590-592. Aug. 1986
- 116 PERCIVAL, D.H. Wood engineering review. **Forest Products Journal**, Madison, Wisc., v. 19, n. 9, p. 111-122. Sept. 1969.
- 117 PEREZ, V.A. (1979). Manual de madera laminada. Departamento de Construcciones en Madera. **Manual**. Instituto Forestal, Chile, n. 11, p.1-227. 1979.
- 118 PETERSON, J.; NOZISKA, D. The tensile strength of laminated members. **Forest Products Journal**, Madison. Wisc. v. 23, n. 11, p. 50-51. 1973.

- 119 PFEIL, W. **Estruturas de Madeira**. 5a. ed. Rio de Janeiro: Livro Técnico. 1989. 295 p.
- 120 RAMMER, D. R.; SOLTIS, L. A. Experimental shear strength of glued laminated beams. **Research Paper**, FPL USDA. Forest Service, Madison. Wisc., n. 527, p.1-38. Apr. 1994.
- 121 RENSBURG, B.W.J. et al. The effect of timber density and type of adhesive on the strength of finger-joints in S.A. pine and *Eucalyptus grandis*. **South Afrikan Fourestry Journal**, Pretoria, n. 140. p. 39-43, Mar. 1987
- 122 ROCHA, J. S.; PAULO, E.V.C.; SIQUEIRA, M.L. **Flexão estática em amostras pequenas, livres de defeitos**. Acta Amazônica . v. 18, n. 1-2, p. 147-162, 1988.
- 123 ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A Review. **General Tech. Report**. FPL. USDA. Forest Service Madison. Wisc., n. 70, p.1-27. Aug., 1991.
- 124 ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F.; SATO, M. Non-destructive evaluation of timber in the United States. In: INTERNATIONAL CONFERENCE . (6.: 1993: Omiya) **Proceedings**. Japan, 1993. p. 1229-1235.
- 125 ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. Nodestructive testing for assessing wood members in structures. A Revi ew. **General Tech. Report**. FPL. USDA. Forest Service, Madison, Wisc., n. 70. p. 1-40. May. 1994.
- 126 SANTINI, E. J. **Influência da temperatura na taxa de secagem e contração da madeira de Pinus elliottii provenientes de plantios de rápido crescimento**. Curitiba: FUPEF, 1980.
- 127 SELBO, M. L.; KNAUSS, A. C.; WORTH, H. E. Glulam timbers show good performance after two decades of service. **Forest Products Journal**. Madison, Wisc. , v. 15, n.11, p. 466-472. Nov. 1965.
- 128 SENFT, J. F. Wood engineering review - 1969. **Forest Products Journal**. Madison. Wisc., v. 21, n. 8, p. 21-34. Aug. 1971
- 129 SHULER, E. C.; GRANT, D.A.; MOODY, R. C. Evaluation of glued laminated beams of Eastern spruce and Eastern hemlock. **Forest Products Journal**. Madison, Wisc., v. 29, n. 7, p. 23-28. July.1979.
- 130 SILVERMAN, I.K. Flexure of laminated beams. **Journal of the Structural Division**. American Society of Civil Engineers. New Orleans, v. 106, n. 03, p. 711-725. Mar. 1980.
- 131 SIMIONI, A. **Sobre a viabilidade técnica da confecção de vigas laminadas com madeira juvenil de Pinus elliottii Engelm**. Curitiba, 1978. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- 132 SMITH, G.D. **An investigation of interface pressures in a clamped assembly of wood laminations**. Madison, 1962. Thesis (Master of Science). University of Wisconsin.
- 133 SIMPSON, W.T. Equilibrium moisture content prediction for wood. **Forest Products Journal**, Madison. Wisc., v. 21, n. 5, p. 48-49. May, 1971.
- 134 SIMPSON, W. T. Dry kiln Operator's Manual. Madison: USDA. F S. FPL. 1991. 274 p. **Agriculture Handbook** n.188.
- 135 SOLLI, K.; AASHEIM, E.; FALK, R.H. The strength of norwegian glued laminated beams. In: MEETING OF INTERNATIONAL COUNCIL FOR BUILDING STRUCTURES. (25: 1992: Ahus) **Proceedings**. Ahus, Sweden, 1992. p. 24-27.
- 136 SOUTH AFRICA BUREAU OF STANDARDS. **Standards specification for glued-laminated timber structural members**. South Africa. 1976. SABS 976-76. 54 p.
- 137 STRICKLER, M.D.; PELLERIN, R. F. Tension proof loading of finger joints for laminated beams. **Forest Products Journal**. Madison, Wisc., v. 21, n. 6, p. 19-24. Jun. 1971.

- 138 ----- Tension proof loading for southern pine beams. **Journal of the Structural Division**, American Soc. of Civil Eng. New Orleans, v. 102, n. 3, p. 645-657. Mar. 1976.
- 139 STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H. **Principles and procedures of statistics**. New York: McGraw-Hill. 1960. 481 p.
- 140 SUNLEY, J. G. **Grade stresses for structural timber in strength properties of timber**. Lancaster. 1974.. MTP construction. p. 121-140
- 141 SUNLEY, J.G.; HUDSON, W. M. Machine grading of lumber in Britain. **Forest Products Journal**. Madison. Wisc., v. 14, p. 155-158. Apr. 1964.
- 142 TANAAMI, R. G. **Influência da umidade e da densidade em propriedades de resistência e elasticidade da madeira**. São Carlos, 1986. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo.
- 143 TANG, R. C. Stress concentration around knots in laminated beams. **Wood and Fiber Science**. Auburn, v. 16, n. 1, p. 57-71. 1984.
- 145 TICHY, R. J. e BODIG, J. Flexural properties of glued laminated lodgepole pine dimension lumber. **Forest Products Journal**. Madison. Wisc., v. 28, n. 3, p. 27-33. Mar. 1978.
- 146 TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. E. **Mecânica dos Sólidos**. Rio de Janeiro: Livro Técnico, 1986. 256 p. v. 1-2.
- 147 TIMOSHENKO, S. P. **Resistência dos Materiais**. Rio de Janeiro: Livro Técnico, 1971. 517 p. v. 2.
- 148 TOMASELLI, I. **Comparação da qualidade da madeira de *Araucaria angustifolia* e *Pinus spp* produzida em reflorestamentos**. In: Relatório Final. Convenio FINEP. UFPR Curitiba, 1979. n. 18, p. 157-161.
- 149 WAHLGREN, H.E.; SCHUMANN, D. R. Properties of major southern pines. pat I. Wood density survey. **Research Paper**, FPL. USDA. Forest Service. Madison, n. 176, p.1-57, 1975
- 150 WALTERS, C. S.; REISS, W. L. Predicting modulus of rupture from modulus of elasticity for small, clear specimens of oak and cottonwood. **Forest Products Journal**. Madison. Wisconsin, v. 27, n. 6, p. 51-53. June, 1977.
- 151 WANGAARD, F.F. **The mechanical properties of wood**. New York: J.Viley, 1950. 377p
- 152 WARDLE, T. M. Glue-laminated timber beams - depth factor and defect dispersal factor. Separata: **New Zealand Forest Service Reprint** n. 182. 2(04). 1970.
- 153 WHALGREN, H.E.; SCHUMANN, D.R. Properties of major southern pines. **Research Paper**, FPL USDA. Forest Service, Madison. n. 176, 177. p. 1-74. 1979.
- 154 WOLFE, R. W.; MOODY, R. C. Bending strength of water soaked glued-laminated beams **Research Paper** FPL. USDA. Forest Service, Madison, n.307, p. 1-12. 1978
- 155 ----- A summary of modulus of elasticity and knot size surveys for laminating grades of lumber. **General Tech. Report**. FPL. USDA. Forest Service, Madison, n.31, p. 1-19. June, 1981.
- 156 ----- North american atructural perfomance tests of low-rise wood- frame building systems. In: Proceedings of a workshop. (1992: Watford, UK.). **Proceedings**. Raleigh, North Carolina, 1991. p. 22-1 - 22-19.
- 157 WYK, van W. J.; GERISCHER, G. F. R. Creep behaviour of laminated pine beams under sustained loading. **South African Forestry Journal**. Pretoria, n. 143, p. 49-52. Dec. 1987.
- 158 ZANDER, J.R.T. **Cáculo e fabricação de madeira laminada**. São Carlos. 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo.